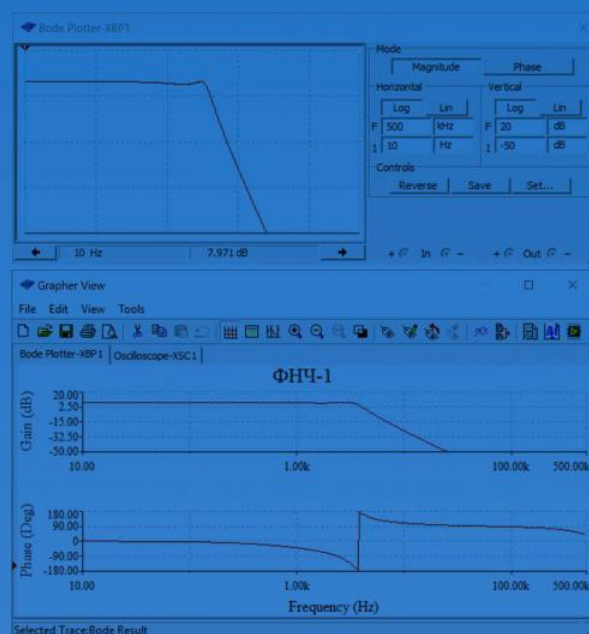
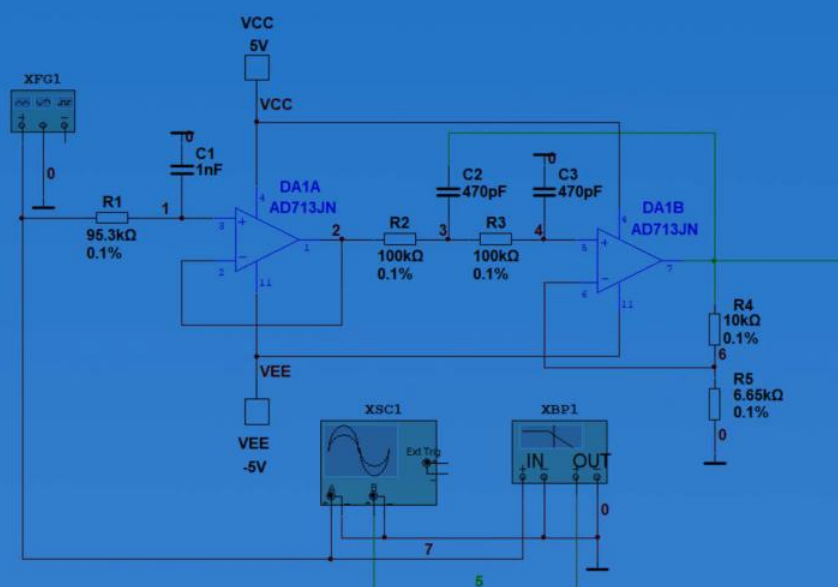


В.В. Макаренко

ВСТУП ДО ТЕХНІКИ ВИМІРЮВАНЬ

Комп'ютерний практикум



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

В.В. Макаренко

ВСТУП ДО ТЕХНІКИ ВИМІРЮВАНЬ

Комп'ютерний практикум

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів, які навчаються
за спеціальністю 171 "Електроніка", освітніх програм
"Акустичні електронні системи та технології обробки акустичної інформації"
та "Електронні системи мультимедіа та засоби Інтернету речей"

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2021

Рецензенти:

*Романов В.О., д.т.н., професор, зав. відділом інституту
кібернетики НАН України*

Прізвище, ініціали, науковий ступінь, вчене звання

Відповідальний редактор:

Трапезон К.О., к.т.н., доцент каф. АМЕС ФЕМ

Прізвище, ініціали, науковий ступінь, вчене звання

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 6 від 25.02.2021 р.)

за поданням Вченої ради факультету (протокол №01/2021 від 25.01.2021 р.)

Електронне мережне навчальне видання

Макаренко Володимир Васильович, канд. техн. наук, доц.

ВСТУП ДО ТЕХНІКИ ВИМІРЮВАНЬ

Комп'ютерний практикум

Вступ до техніки вимірювань: комп'ютерний практикум для студ. спеціальності 171 "Електроніка" освітніх програм "Акустичні електронні системи та технології обробки акустичної інформації" та "Електронні системи мультимедіа та засоби Інтернету речей" / В.В. Макаренко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 3, 35 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 68 с.

У комп'ютерному практикумі наведені теоретичні відомості, моделі для самостійного виконання індивідуальних завдань. методики вимірювання параметрів сигналів та електронних пристроїв, правила користування віртуальними вимірювальними пристроями та методами аналізу у спіс-симуляторі Multisim Analog Devices Edition. Посібник призначений для використання при дистанційному навчанні при відсутності можливостей використання реальних вимірювальних пристроїв, а також може бути використаний для самостійної роботи студентів для поглибленого засвоєння принципів та способів вимірювання електричних характеристик електронних пристроїв та вимірювання параметрів сигналів.

© В.В. Макаренко 2021

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021

ЗМІСТ

Вступ.....	5
Практичне заняття 1. Налаштування програми Multisim.....	6
1.1 Призначення програми NI Multisim	6
1.2 Початок роботи із програмою NI Multisim	7
1.3 Компоненти й прилади Multisim.....	11
1.4. Віртуальні вимірювальні прилади програми Multisim	13
1.4.1 Загальні зауваження	13
1.4.2 Правила роботи з осцилографом	15
1.4.3 Правила роботи з функціональним генератором	19
1.5 Завдання для самостійної роботи	20
Практичне заняття 2. Вимірювання напруги та струму	22
2.1 Теоретичні відомості. Включення вольтметрів у електричне коло	22
2.2 Включення амперметрів у електричне коло.....	24
2.3 Завдання для самостійної роботи	25
Практичне заняття 3. Вимірювання амплітудно-частотних характеристик.....	27
3.1 Теоретичні відомості.....	27
3.2 Завдання для самостійної роботи	29
3.2.1 Підготовка моделі для досліджень	29
3.2.2 Вимірювання АЧХ та розрахунок добротності.....	30
3.4 Звіт з практичного заняття	32
3.5 Контрольні питання	32
Практичне заняття №4. Вимірювання спектру сигналів за допомогою аналізатора спектру Spectrum Analyzer.....	33
4.1 Теоретичні відомості.....	33
4.2 Завдання для самостійної роботи	36
Контрольні питання	37

Практичне заняття №5. Вимірювання амплітудних характеристик електронних пристроїв.....	38
5.1 Теоретичні відомості.....	38
5.2 Завдання для самостійної роботи	41
Контрольні питання	43
Практичне заняття 6. Аналіз параметрів кіл при зміні параметрів елементів	44
6.1 Теоретичні відомості.....	44
6.2 Завдання для самостійної роботи	51
Контрольні питання	52
Практичне заняття 7. Вимірювання опору	53
7.1 Теоретичні відомості.....	53
7.1.1 Мостовий метод вимірювання опору	53
7.1.2 Вимірювання опору з використанням джерела струму	56
6.2 Завдання для самостійної роботи	60
Контрольні питання	60
Практичне заняття 8. Вимірювання індуктивності котушок	62
8.1 Теоретичні відомості. Вимірювання величини індуктивності шляхом вимірювання значення напруги.....	62
8.2 Завдання для самостійної роботи	66
Контрольні питання	67
Література	68

Вступ

Навчальний посібник "Вступ до техніки вимірювань. Комп'ютерний практикум" забезпечує цикл професійної підготовки бакалаврів спеціальності 171 "Електроніка" левітніх програм: "Акустичні електронні системи та технології обробки акустичної інформації" та "Електронні системи мультимедіа та засоби Інтернету речей".

Призначення посібника навчити студентів самостійні роботі з віртуальними вимірювальними пристроями, що дозволить їм засвоїти не тільки методи вимірювання параметрів електричних сигналів та характеристик електронних пристроїв, але й використати ці навички при роботі з фізичними вимірювальними пристроями.

Це можливо завдяки тому, що для навчання використовується spice-симулятор NI Multisim, інтерфейс віртуальних пристроїв якого максимально наближений до реальних приладів.

Наведені приклади виконання вимірювань характеристик електричних сигналів за допомогою віртуальних вимірювальних пристроїв та універсальні методики аналізу характеристик на прикладах простих електронних пристроїв, дозволять студентам засвоїти матеріал самостійно. Численні приклади аналізу моделей різних електронних пристроїв та вузлів, дозволять більш детально ознайомитись з процесами вимірювання і обробки результатів, отриманих в процесі роботи.

Мета навчального посібника полягає в закріпленні набутих при вивченні лекційного матеріалу знань, навчити студентів аналізувати роботу електронних пристроїв за допомогою імітаційного моделювання.

Розроблений цикл практичних занять, дозволяє закріпити матеріал, який вивчається в рамках курсу, набути навичок роботи з вимірювальною апаратурою різного призначення (хоча і віртуальною) і освоїти методику організації і проведення експериментів у відповідності з поставленими завданнями.

Практичне заняття 1. Налаштування програми Multisim

1.1 Призначення програми NI Multisim

Для успішного проведення практичного заняття необхідно встановити програму NI Multisim 10 Analog Devices Edition і ознайомитись з літературою [1].

Для моделювання роботи електронних пристроїв застосовують програми схемотехнічного моделювання – spice-симулятори. Безкоштовна версія програми моделювання NI Multisim Analog Devices Edition версії 10 призначена для моделювання схем з використанням як аналогових, так і цифрових компонентів. Як і повнофункціональна версія програми (остання версія 14.2), вона містить усі вимірювальні пристрої, дозволяє проводити всі види аналізу. Для користувачів доступна велика кількість діодів, транзисторів, аналогових і цифрових мікросхем, а також цілий набір віртуальних елементів з ідеалізованими параметрами.

Однак треба враховувати і обмеження, що накладає ця безоплатна версія. Кількість елементів на робочому аркуші схеми не повинна перевищувати 25. Однак це обмеження не заважає у більшості випадків використовувати цю програму для навчальних цілей. А дружній користувацький інтерфейс, у якому віртуальні вимірювальні пристрої мають такий же вигляд як і реальні пристрої, дозволяє користувачу засвоїти правила роботи з вимірювальними приладами навіть при їх фізичній відсутності. Це найбільш зручна програма для використання в учбових цілях.

Основні достоїнства програми Multisim:

Простий редактор дозволяє просто малювати на екрані електронні схеми у звичному зображенні.

Велика кількість електронних компонентів: пасивних – R, L, C, діодів, транзисторів, інтегральних схем аналогових, цифрових і змішаних аналого-цифрових.

Велика кількість прикладів моделей для більш швидкого засвоєння навичок роботи з програмою

Велика кількість віртуальних вимірювальних приладів, що дозволяють виконувати велику кількість різних типів вимірювання.

Широкий вибір методів аналізу, які дозволяють крім традиційного моделювання електронної схеми по постійному й змінному струму, провести аналіз спектральних, нелінійних, амплітудно-частотних та фазо-частотних характеристик, впливу температури на окремі компоненти й на схему в цілому, можливість зміни багатьох параметрів компонентів, джерел сигналів і джерел живлення.

Низькі вимоги до швидкодії комп'ютера.

Не вимагає знань мови програмування Spice. Інтуїтивно-зрозумілий інтерфейс дозволяє

швидко ознайомиться з основами роботи в Multisim й приступитися безпосередньо до досліджень.

1.2 Початок роботи із програмою NI Multisim

Роботу із програмою слід починати з встановлення основних параметрів робочого середовища. Для цього необхідно в меню Options вибрати пункт Global Preferences (рис. 1.1). У вікні що відкривається є чотири вкладки. На вкладці **Parts** необхідно встановити відображення елементів схеми за стандартом DIN, які відповідають зображенню більшості елементів за системою єдиної конструкторської документації ЄСКД.

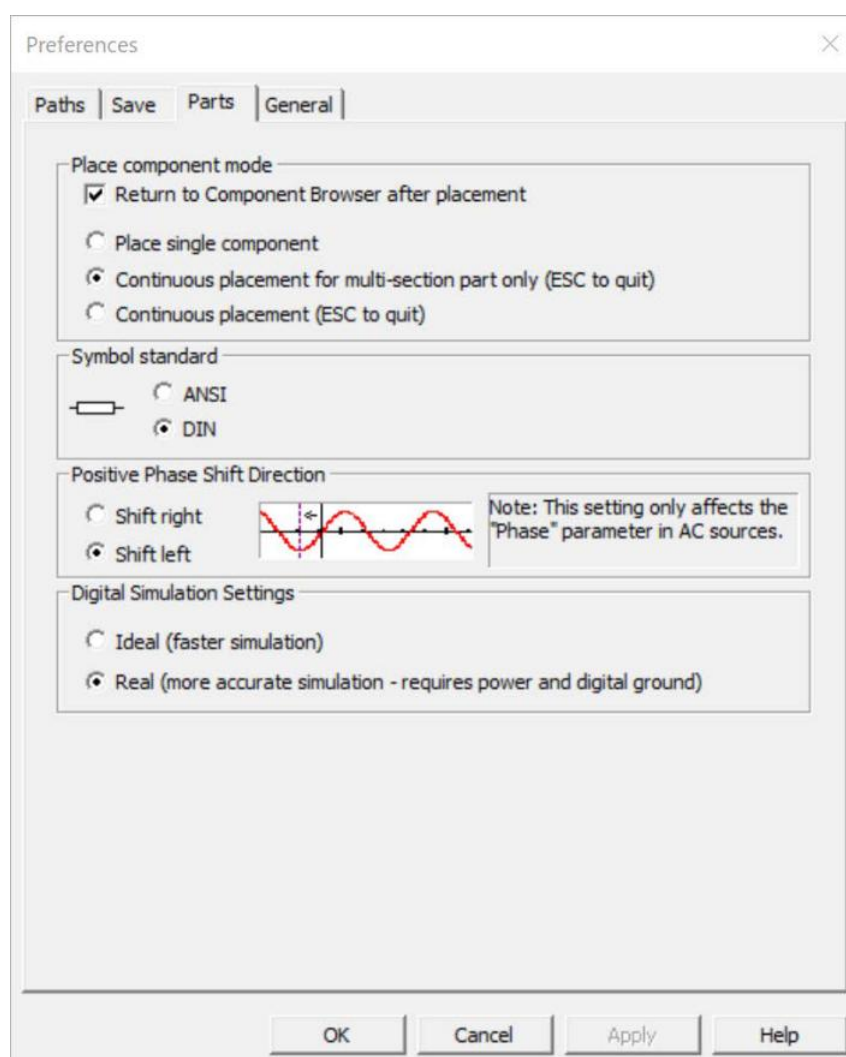


Рис. 1.1. Налаштування відображення елементів за стандартом DIN

Стандарт ANSI (American National Standards Institute) не відповідає міжнародним стандартам і не рекомендується для використання. У Нових версіях Multisim замість стандарту

DIN треба встановити стандарт відображення елементів IEC 60617.

Щоб результати моделювання були більш близькими до реальних потрібно у зоні Digital Simulation Settings поставити позначку на пункті Real.

На вкладці Paths можна задати шлях до робочої папки програми, що відрізняється від заданого по замовчуванню. На вкладці Save треба встановити пташку у вікні автозбереження (Auto-backup) і час, через який буде здійснюватися автозбереження (рис. 1.2). При необхідності можна здійснювати створення прихованої копії (Create a "Security Copy") для відновлення останньої працездатної версії досліджуваної схеми (у випадку ушкодження файлу схеми) і режим збереження даних моделювання разом з параметрами вимірювальних приладів (Save simulation data with instruments).

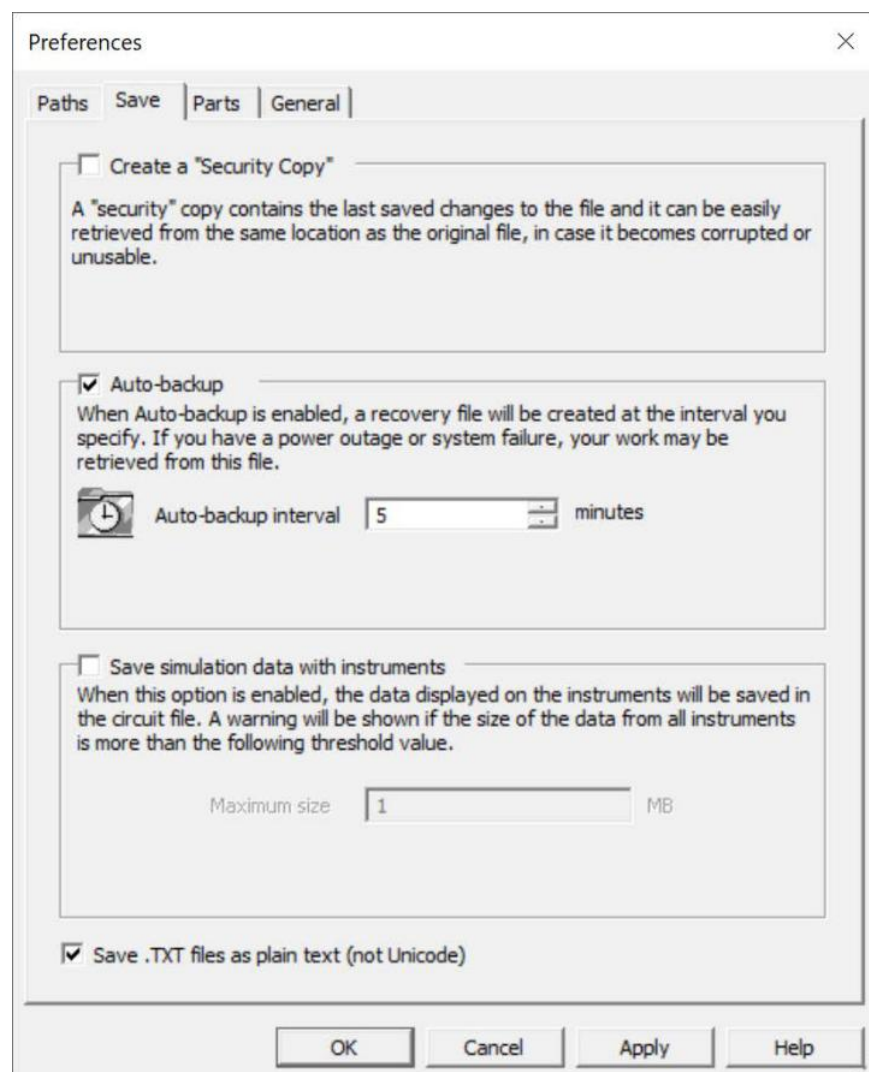


Рис. 1.2. Вкладка встановлення режимів збереження файлів

Для встановлення параметрів робочого аркуша програми треба відкрити меню Options/Sheet Properties (рис. 1.3). У цьому вікні теж у наявності чотири вкладки.

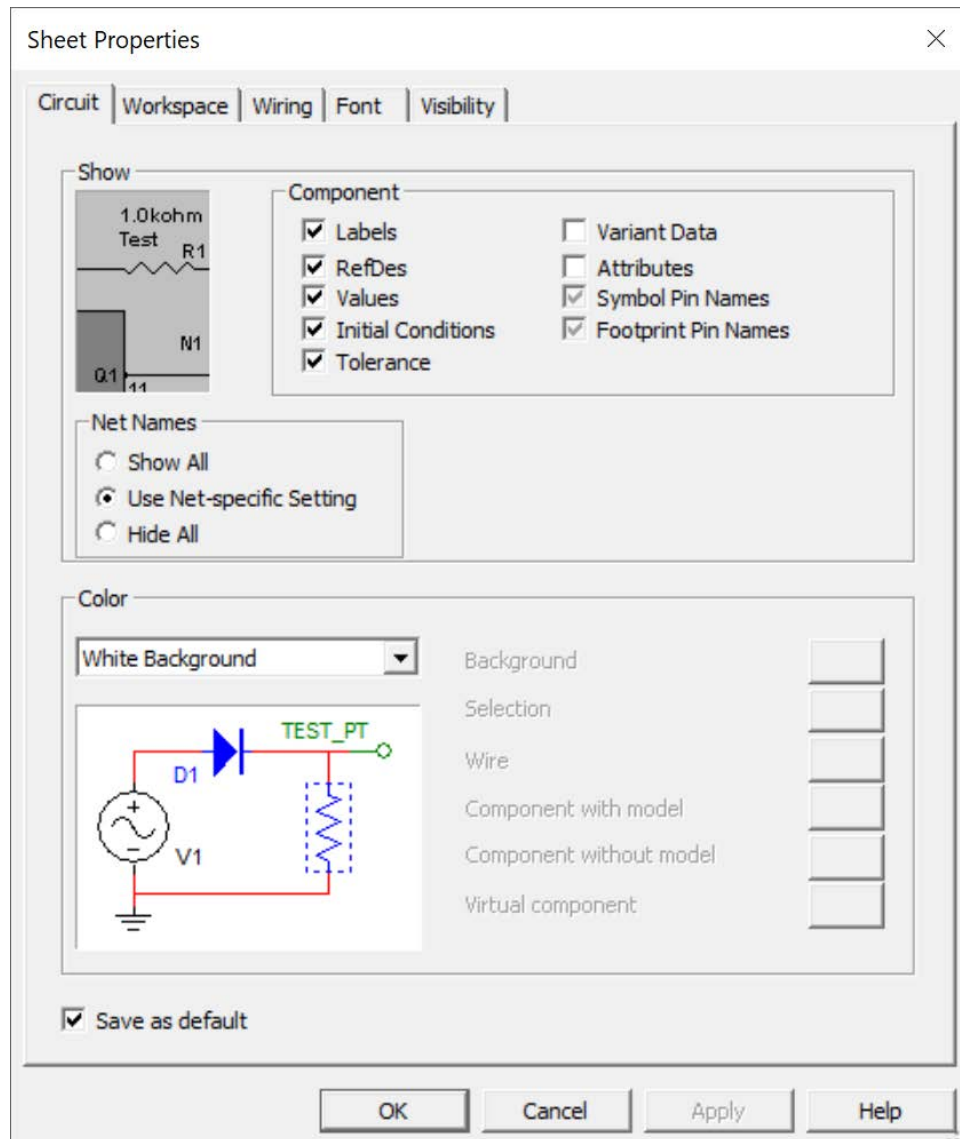


Рис. 1.3. Вікно налаштування Sheet Properties вкладка Circuit

На цій вкладці (рис. 1.3) задається колір фону і елементів схеми. Доступно 5 варіантів встановлення параметрів:

- білий або чорний фон й колір елементів і ліній за замовчуванням;
- чорний фон й білі елементи й лінії;
- білий фон й чорні елементи й лінії.

У режимі Custom користувач може задати колір усіх елементів і фону самостійно, як показано на рис. 1.4. В Sheet Properties задаються товщина ліній, режим відображення сітки, вибирається розмір і тип шрифту, розмір і орієнтація робочого аркуша й ще цілий ряд параметрів.

Докладно з пунктами меню і їх призначенням або за допомогою підказки програми (англ. мовою).

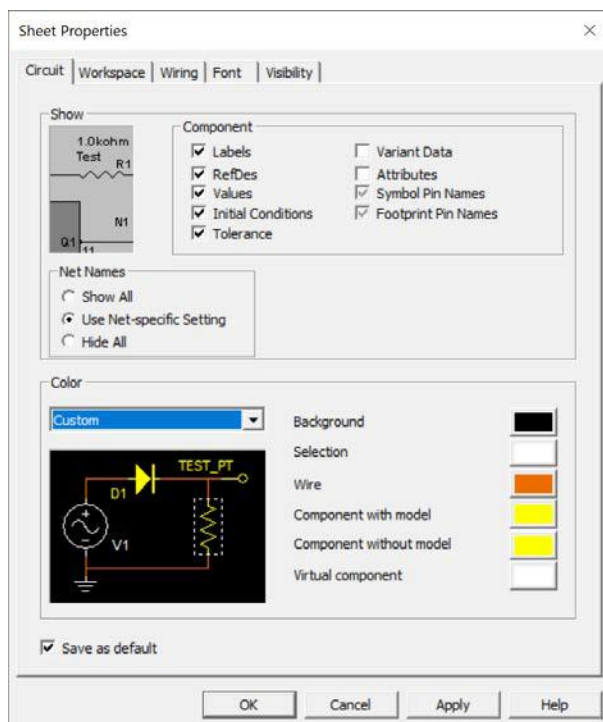


Рис. 1.4. Встановлення кольору елементів робочого аркушу користувачем

Для забезпечення достатнього простору для розміщення елементів моделі на робочому аркуші рекомендується встановити розмір робочого аркушу та відображення на ньому сітки так, як показано на рис. 1.5.

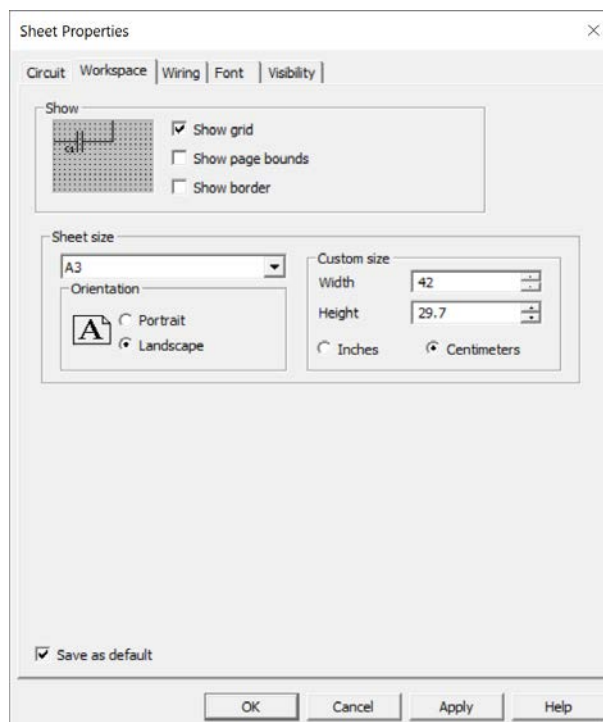


Рис. 1.5. Встановлення розміру та відображення сітки робочого аркушу

Налаштування вигляду робочого вікна й панелі інструментів зробити просто. Для цього досить помістити курсор "миші" в область аркушу з панелями інструментів і натиснути праву кнопку "миші". У контекстному меню, що відкривається, необхідно поставити пташки біля тих панелей інструментів, які необхідно відображати.

1.3 Компоненти й прилади Multisim

Після встановлення параметрів програми можна приступити до створення моделі принципової схеми. Для цього потрібно розмістити елементи схеми на робочому аркуші. Для розміщення елемента потрібно клацнути лівою кнопкою "миші" на піктограмі потрібної бібліотеки (рис. 1.6) і у вікні що відкриється, обрати потрібний компонент. Це можна зробити і через меню Place/Component. За замовчуванням панель компонентів відображається у вікні програми (рис. 1.7). Користувачеві доступні бібліотеки джерел живлення, генераторів сигналів, пасивних компонентів, транзисторів і діодів, логічних і аналогових мікросхем, змішаних аналого-цифрових і цифро-аналогових компонентів, індикаторів, запобіжників, джерел опорної напруги, електромеханічних компонентів (двигунів, механічних контактів, котушок, трансформаторів і ін.).

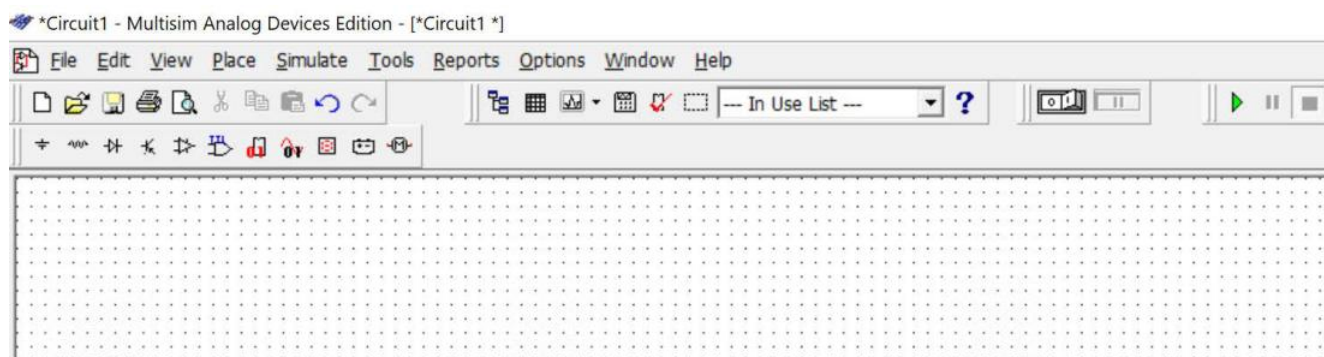


Рис. 1.5. Фрагмент робочого вікна програми з бібліотеками елементів



Рис. 1.6. Панель компонентів

На рис. 1.7 наведений склад бібліотек елементів Multisim.

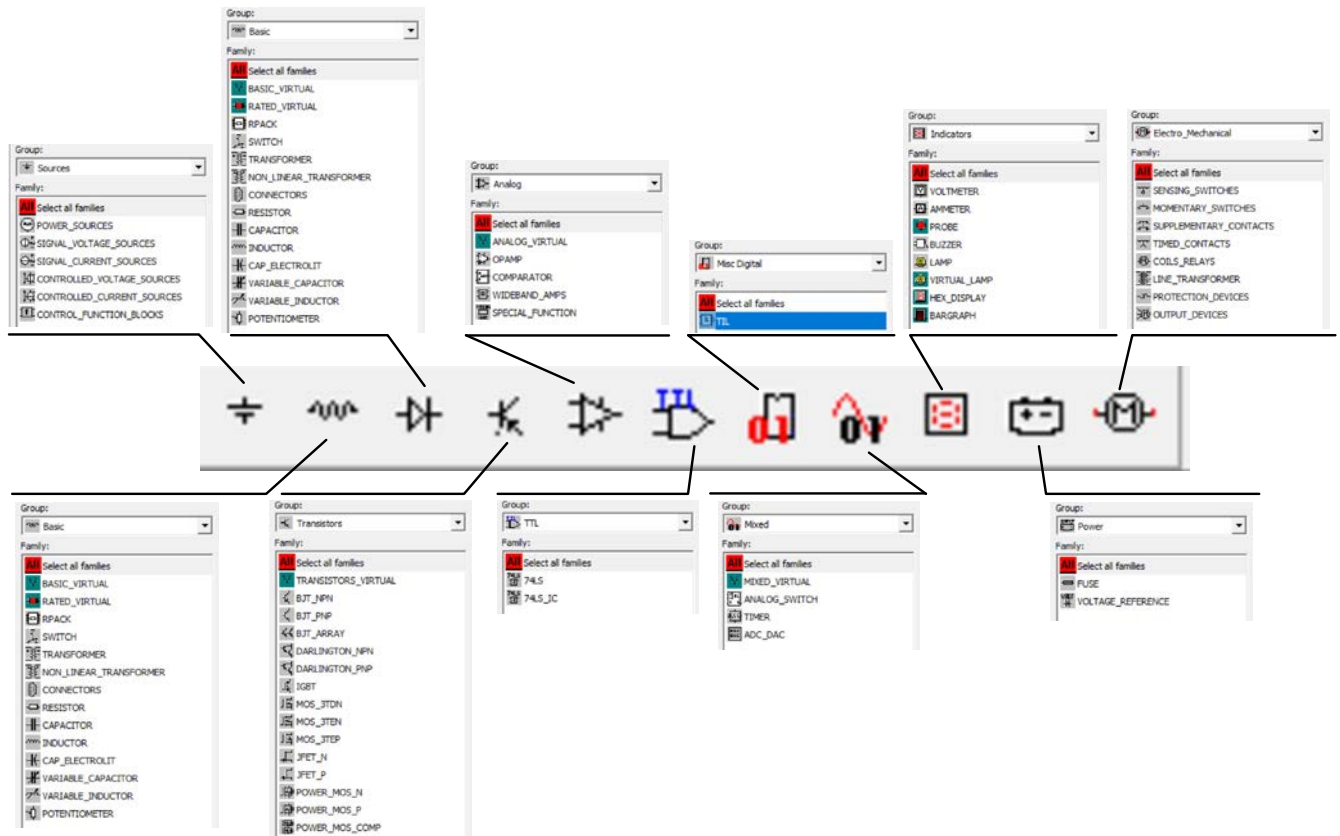


Рис. 1.7. Склад бібліотек компонентів Multisim

Деякі елементи бібліотек джерел потужності й генераторів сигналів наведені в табл. А1.

Таблиця 1.1. Елементи бібліотек джерел потужності й генераторів сигналів

POWER_SOURCES							SIGNAL_SOURCES	
DC_Power	DGND	Ground	VCC	VDD	VEE	VSS	Clock_Voltage	AC_Voltage
Джерело постійної напруги	Цифровий загальний	Загальний	Джерело +U _ж для ІМС ТТЛ	Джерело +U _ж для ІМС КМОП	Джерело -U _ж	Джерело живлення КМОП	Генератор імпульсів позитивної	Генератор змінної напруги

На рис. 1.8 наведений приклад вікна програми при виборі конденсаторів. У вікні Component вибирається номінальне значення ємності конденсаторів, а у вікні Component type – тип виконання конденсатора: керамічний, електролітичний, танталовий та інші. Точність ємності обраного конденсатора (відхилення від номінального значення) вибирається у вікні Tolerance (%)

з ряду 0, 2, 5, 10 і 20. Для резисторів цей ряд виглядає як 0, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5 і 10.

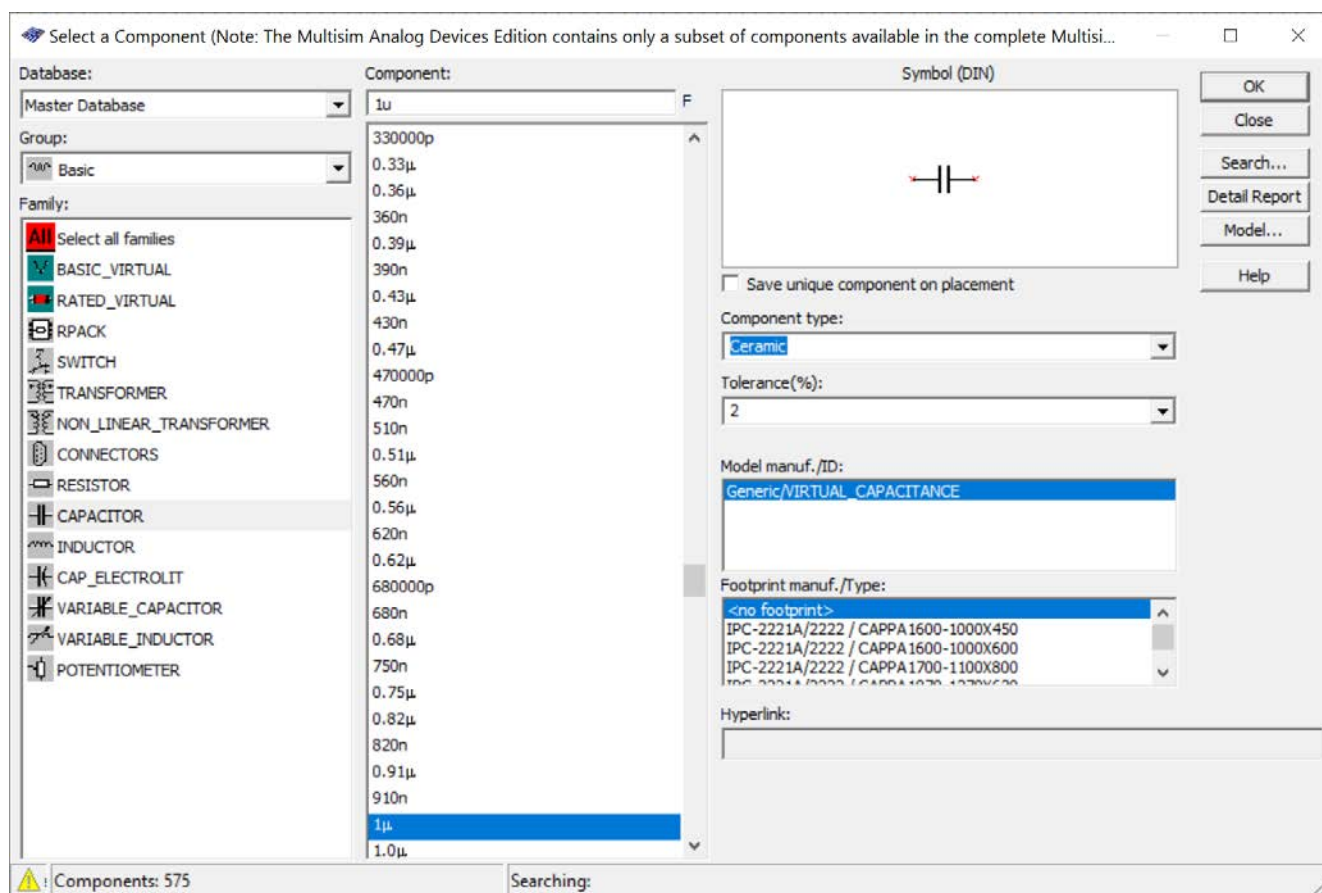


Рис. 1.8. Вікно вибору значення ємності та параметрів конденсатора

При виборі інших компонентів (наприклад, змінного резистора або резистора) у вікнах вибору параметрів компонентів будуть з'являтися інші дані (характерні для обраного типу компонентів).

1.4. Віртуальні вимірювальні прилади програми Multisim

1.4.1 Загальні зауваження

Програма дозволяє використовувати прилади, показані на рис. 1.9. Кожний з віртуальних приладів має багато параметрів, більшість з яких потребують налаштування в процесі роботи. Для аналізу роботи моделей обмежимося самими необхідними пристроями:

двоканальним та чотирьохканальним осцилографами для аналізу форми сигналу у різних точках моделей;

- функціональним генератором у якості джерела сигналу;
- графопобудовником АЧХ і ФЧХ (Bode Plotter).

Для розміщення приладу досить клацнути лівою кнопкою "миші" на піктограмі приладу, розміщеної з правої сторони робочого вікна програми, і перетягнути зображення в потрібне місце робочого аркушу.

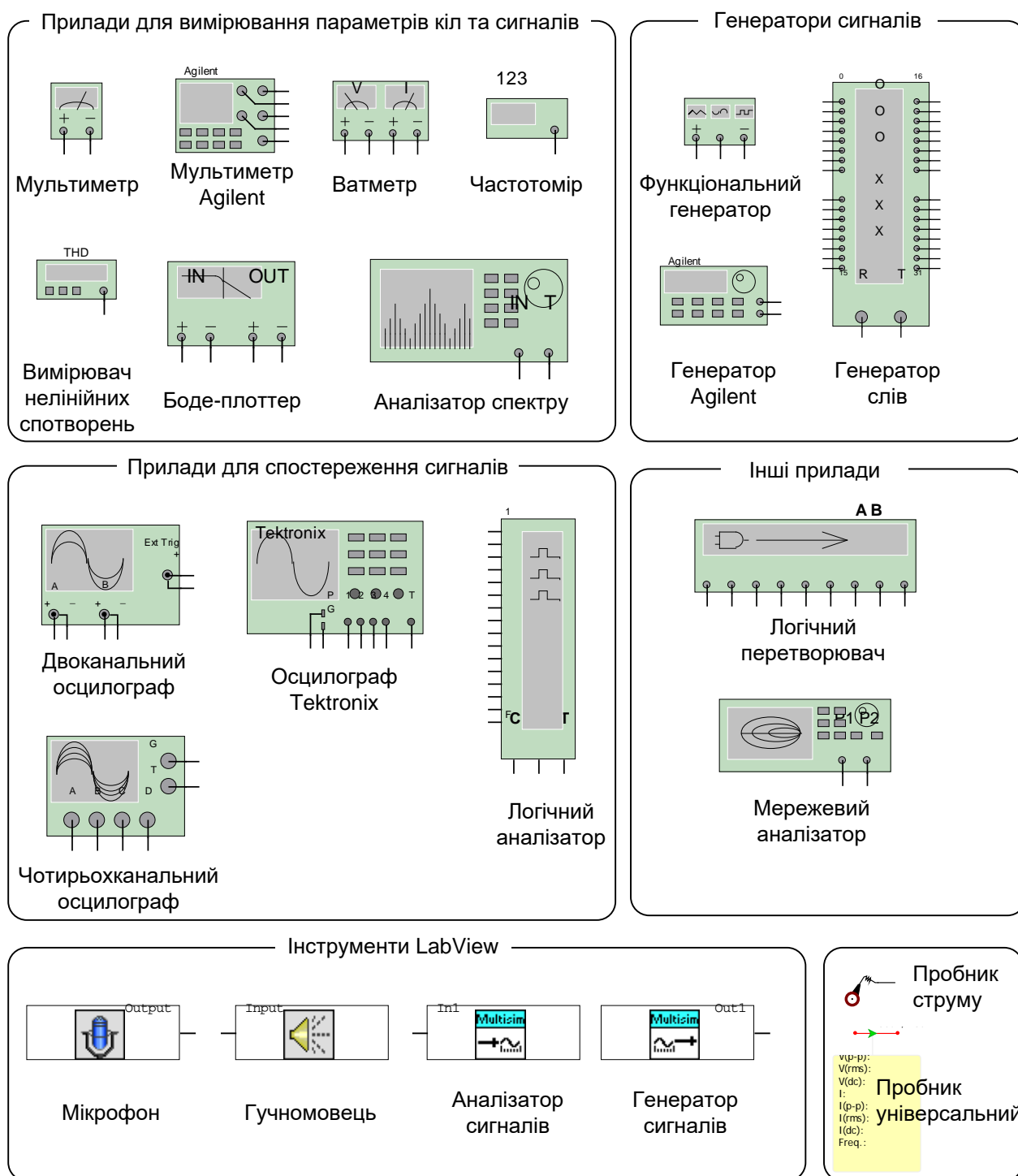


Рис. 1.9. Віртуальні вимірювальні прилади програми Multisim

1.4.2 Правила роботи з осцилографом

У програмі Multisim доступні 4 типи осцилографів. Розглянемо особливості роботи з двох- і чотирьохканальним осцилографами. Органи управління двоканальним осцилографом показані на рис. 1..10.

Масштаб зображення по вертикалі регулюється дискретно в кожному каналі незалежно органами регулювання чутливості входу (Scale) окремо у кожному каналі. Масштаб зображення по горизонталі – тривалістю розгортки (Scale), органи управління якою знаходяться у лівому нижньому кутку панелі управління осцилографом. У кожному каналі передбачена можливість зсуву зображення по вертикалі як вгору, так і вниз (Y Position). Зсув по горизонталі здійснюється за допомогою зміни значення “X position”.

Щоб зображення не зміщувалося по горизонталі необхідно синхронізувати розгортку осцилографа з початком чергового періоду сигналу. Для синхронізації переважно обирати режим “Nor” і задавати рівень синхронізації в рядку “Level” рівний від 10 до 50% амплітуди сигналу, яким здійснюється синхронізація. Це може бути сигнал каналу А або В (по фронту або спаду), а також сигнал зовнішнього джерела сигналу, що підключається до входу “Ext. Trigger”.

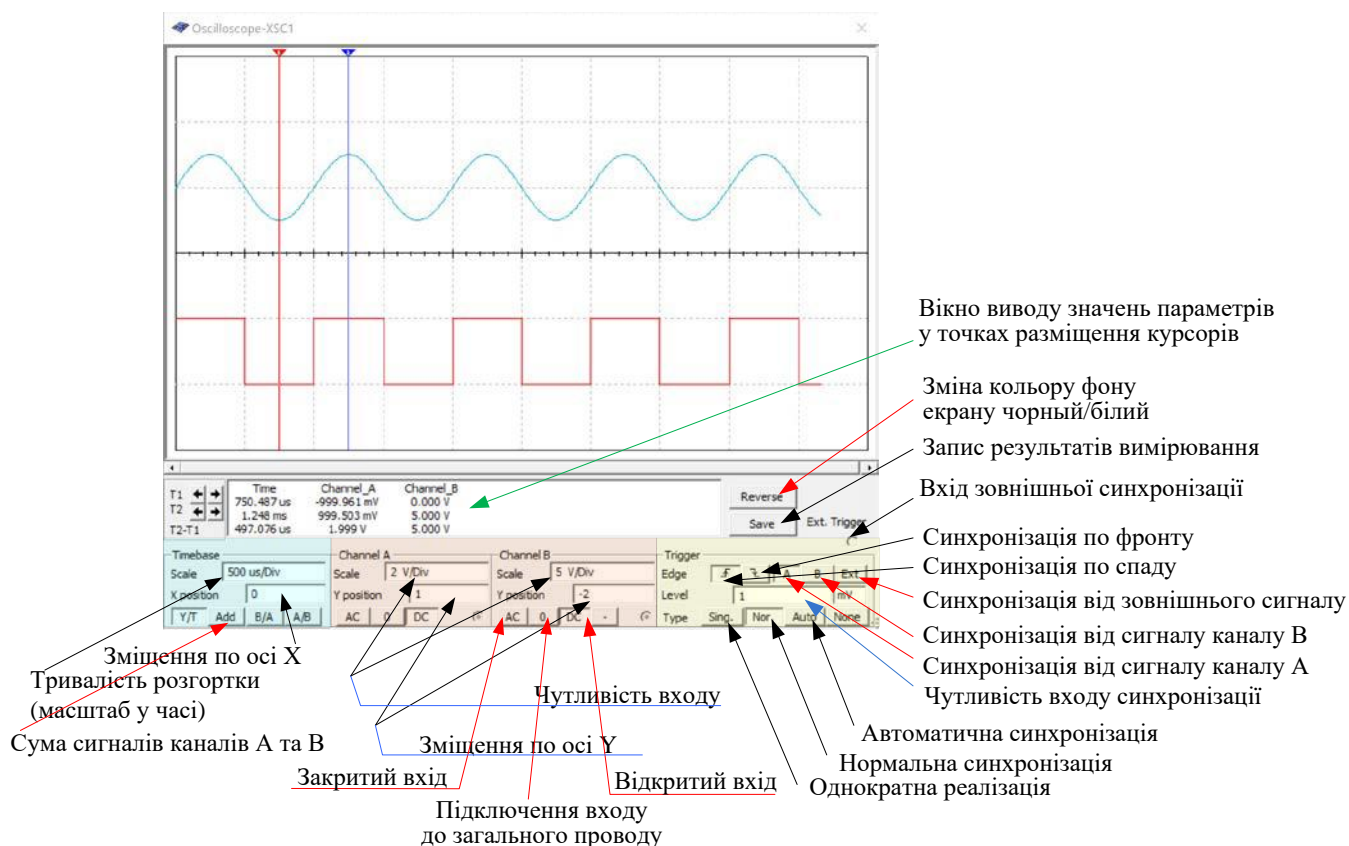


Рис. 1.10. Органи управління двоканальним осцилографом

Якщо у сигналі наявна постійна складова, то рівень синхронізації треба встановлювати з урахуванням величини постійної складової. Наприклад, гармонійний сигнал з амплітудою 1 В має постійну складову 2 В. При синхронізації такого сигналу потрібно встановити чутливість входу синхронізації не нижче 2,01 В (рис. 1.11).

При дослідженні сигналів різної частоти слід вибирати для синхронізації сигнал з найнижчою частотою, як показано на рис. 1.12. Синхронізація здійснюється від сигналу що подається на вхід каналу В. Якщо включити синхронізацію від каналу А, то сигнали будуть весь час зміщуватись один відносно одного по горизонтальній осі.

Вимірювання параметрів сигналу в будь якій точці (наприклад, амплітуда і часовий інтервал від початку розгортки) можна здійснювати як по діленням нанесеним на екрані, так і за допомогою курсорів (червоний і синій трикутники у верхній частині екрана осцилографа). Треба перемістити курсор в потрібну точку екрану і у вікні виводу значень параметрів в точці розміщення курсора прочитати покази (рис. 1.11).

Наприклад, на рис. 1.11 у полі відображення значень параметрів значення напруги дорівнює 2.08 В у точці відміченій червоним курсором. Напруга у точці, відміченій синім курсором, дорівнює 3 В. У нижньому рядку цього поля відображено значення різниці напруги між точками відміченими курсорами.

У рядку Time відображається положення курсорів у часі, а в нижньому рядку – різниця часу між курсорами. Тобто за допомогою осцилографа можна виміряти не тільки рівні сигналів, а і тривалість імпульсів або періодів сигналів.

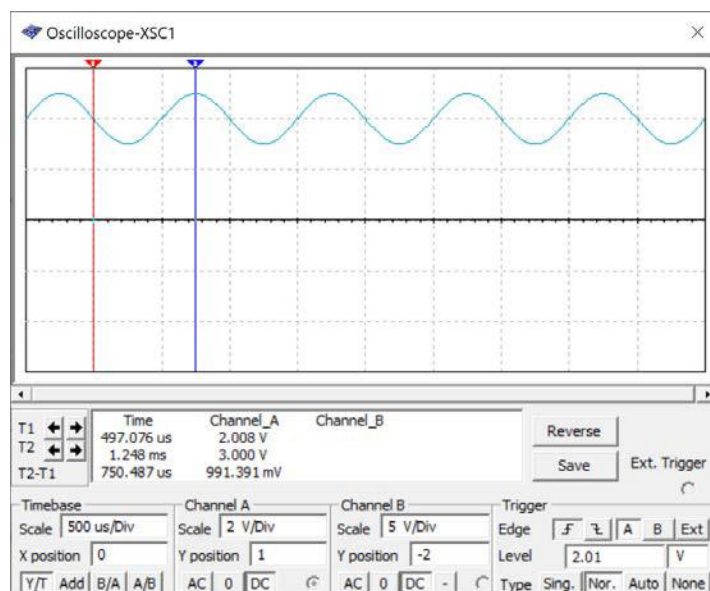


Рис. 1.11. Встановлення рівня синхронізації при наявності постійної

складової 2 В у досліджуваному сигналі

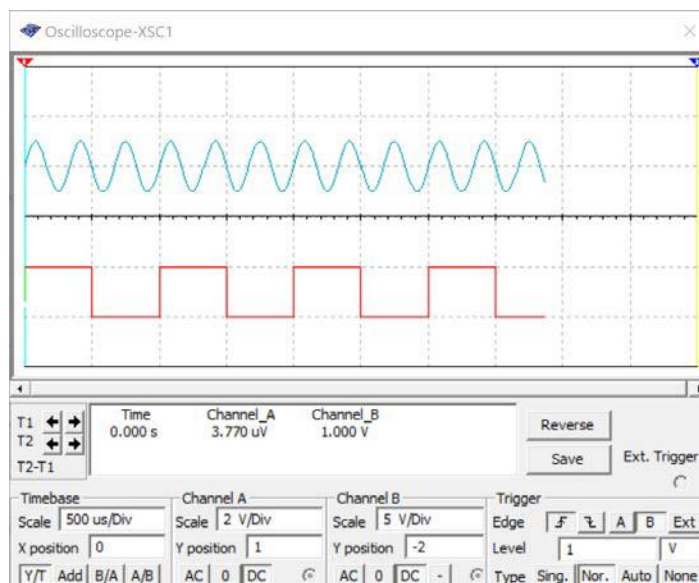
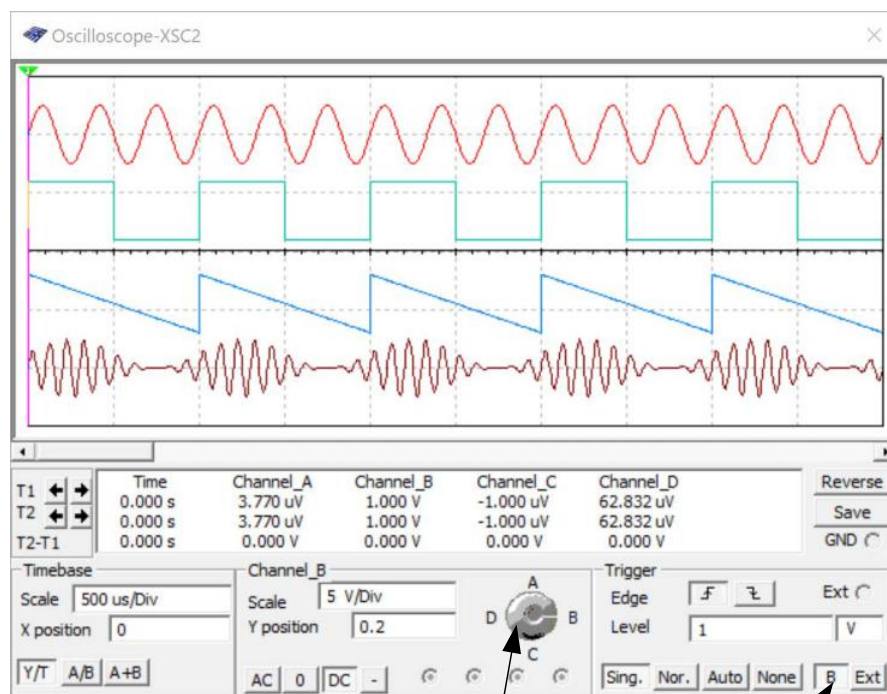


Рис. 1.12. Синхронізація осцилографа сигналом з більш низькою частотою

Органи управління чотирьохканальним осцилографом ідентичні органам управління двоканального осцилографа окрім управління чутливістю і зміщенням у кожному з каналів. На рис. 1.13.



Перемикач входів осцилографа
для налаштування чутливості
та зміщення по вертикалі

Вибір каналу
синхронізації

Рис. 1.13. Органи управління чотирьохканальним осцилографом

Для регулювання чутливості і зміщення в необхідному каналі треба встановити показчик (біла рисочка) на потрібну букву і задати параметри в обраному каналі. Аналогічно здійснюється регулювання і в інших каналах.

Сигнали, що подаються на входи осцилографа, треба розташовувати по вертикалі за простим правилом. Канал А повинен бути самим верхнім, а канал D – самим нижнім. У двоканальному осцилографі нижнім повинен бути канал В.

Для того, щоб на екрані осцилографа сигнали різних каналів відображалися різним кольором, необхідно поміняти кольори ліній, яка підходить до різних входів осцилографа. Для цього виділяють лінію клацанням лівої кнопки "миші" і потім натискають праву кнопку. У контекстному меню, що з'явився, потрібно вибрати пункт Segment Color (рис. 1.14).

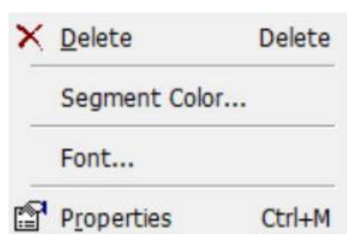


Рис. 1.14. Схема з підключеними приладами показана на рис. 1.10.

Після вибору пункту Segment Color відкривається вікно вибору кольору (рис. 1.15).

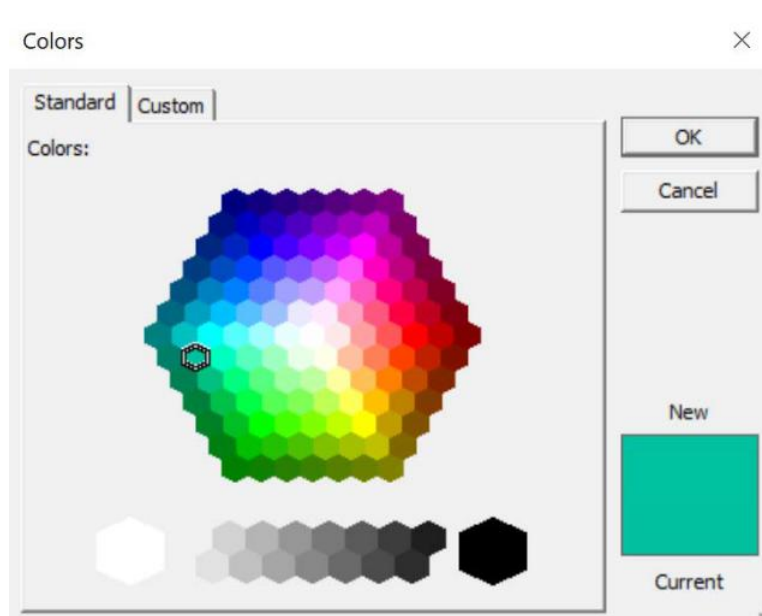


Рис. 1.15. Вікно вибору кольору лінії

Процедуру зміни кольору треба повторити для кожної лінії, що підходить до входу осцилографу.

1.4.3 Правила роботи з функціональним генератором

Позначення функціонального генератора, та вікно налаштування його параметрів (відкривається при подвійному клацанні лівою кнопкою "миші" по зображенню генератора.

У вікні, що відкрилося, потрібно встановити параметри сигналу на виході функціонального генератора (рис. 1.16). Можна вибрати форму сигналу: синус, трикутник, прямокутник. Частота сигналу задається в рядку Frequency у діапазоні від 1 фГц (відповідає 10^{-12} Гц) до 10^3 ТГц (терагерць). Амплітуда в діапазоні від 1 фВ до 10^3 ТВ. Напряга зсуву задається в тому ж діапазоні. За замовчуванням на виході генератора формується двополярна напруга. Наприклад, як показано на рис. 1.16, задана амплітуда 10 В для гармонічного сигналу. На виході генератора будуть сформований сигнал з позитивною і негативною амплітудами 10 В. Якщо потрібно сформувати однополярний сигнал (наприклад, прямокутні імпульси амплітудою 5 В), потрібно задати амплітуду сигналу рівну половині необхідної (для прикладу 2,5 В) і задати позитивний зсув напруги рівний +2,5 В.

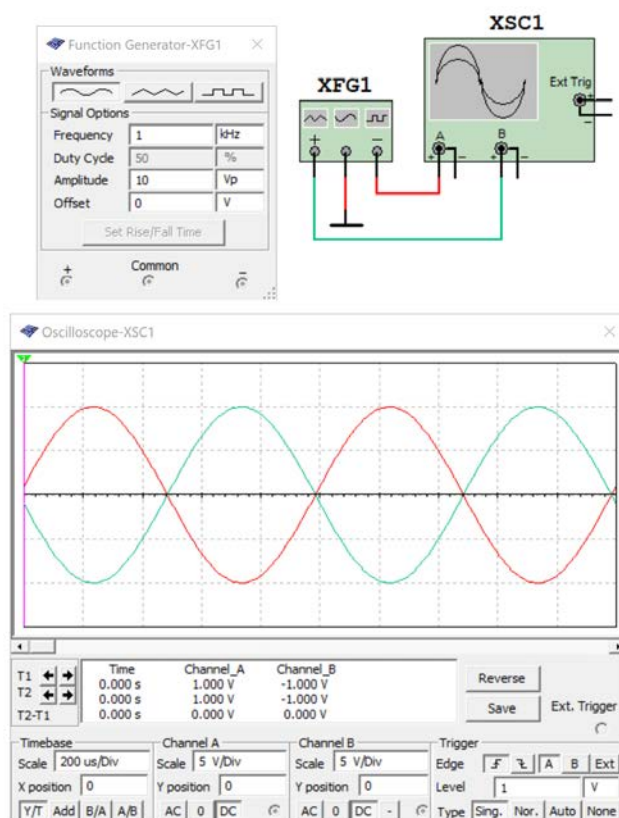


Рис. 1.16. Вікно налаштування параметрів функціонального генератора та осцилограми сигналів на виходах функціонального генератора

У функціонального генератора у передбачено два виходи, сигнали на яких формуються однакової форми, амплітуди і частоти, а фази сигналів зміщені на 180 градусів. Тобто сигнали

протифазні, що ілюструють осцилограми сигналів на рис. 1.16.

1.5 Завдання для самостійної роботи

1. Налаштувати інтерфейс програми.
2. Задати розмір аркушу A3, розташування альбомне.
3. Створити модель схеми, наведеної на рис. 1.17 і відобразити форму сигналів на осцилографі. Параметри моделі для кожного з користувачів наведені у табл. 1.2. Скопіювати модель і вставити її у текстовий редактор (наприклад Microsoft Word).

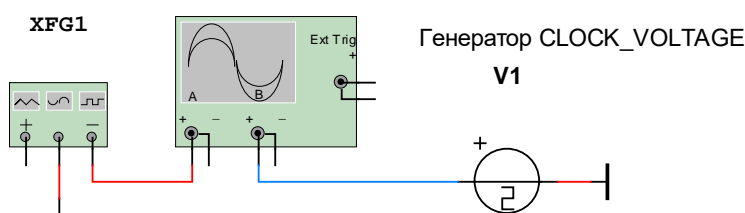


Рис. 1.17. Модель для освоєння роботи з осцилографом та генераторами сигналів

4. Налаштувати генератори сигналів. Налаштування генератора прямокутних імпульсів CLOCK_VOLTAGE можна зробити клацнувши двічі лівою кнопкою "миші" по зображенню генератора (рис. 1.18).

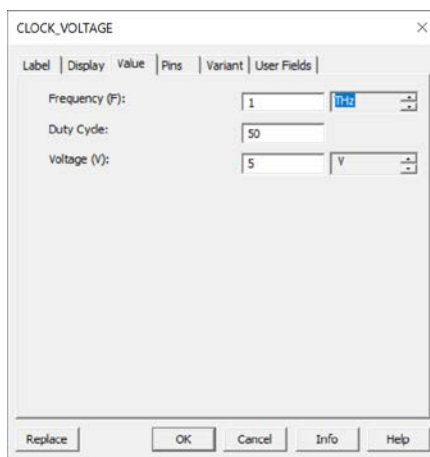


Рис. 1.18. Вікно налаштування генератора прямокутних імпульсів CLOCK_VOLTAGE

У вікно Frequency (частота) треба вписати потрібне значення частоти, а у віконці з написом kHz обрати потрібну одиницю вимірювання – від пГц (пікогерць – pHz) до ТГц (терагерць – THz).

Величина Duty Cycle показує відношення тривалості імпульсу до періоду слідування

імпульсів у процентах. Значення 50% означає, що тривалість імпульсу складає половину від періоду слідування імпульсів.

У вікно Voltage потрібно вписати необхідну напругу вихідного сигналу.

5. Виміряти за допомогою осцилографа амплітуду сигналів в обох каналів. Зробити скріншоти з результатами вимірювання і розмістити їх у документі звіту. Сигнали повинні бути синхронізовані (дивись рекомендації по синхронізації осцилографів).

6. Виміряти за допомогою осцилографа тривалість прямокутного імпульсу. Зробити скріншот результатів вимірювання і помістити його у звіт.

7. Виміряти період сигналу функціонального генератора. Зробити скріншот результатів вимірювання і помістити його у звіт.

8. Зберегти файл звіту і моделі з ім'ям Пр1_Прізвище_гр.ms10 та Пр1_Прізвище_гр.docx, де гр. – учбова група.

Таблиця 1.2. Параметри сигналів моделі

№ варіанту	Параметри функціонального генератора				Параметри генератора імпульсів		
	Форма сигналу	Амплітуда сигналу, В	Частота сигналу, кГц	Напруга зміщення, В	Амплітуда сигналу, В	Частота сигналу, кГц	Duty Cycle, %
	П	1	0,1	0,1	1	1	2
	~	2	0,25	0,25	1,5	2	3
	Λ	3	0,5	0,5	2	3	5
	П	4	1	0,75	2,5	4	7
	~	5	1,5	1	3	5	10
	Λ	6	2	1,1	3,5	6	13
	П	7	2,5	1,2	4	7	15
	~	8	3	1,3	4,5	8	18
	Λ	9	3,5	1,4	5	9	21
	П	10	4	1,5	5,5	10	25
	~	9	4,5	1,6	1	20	30
	Λ	8	5	1,7	1,5	30	35
	П	7	5,5	1,8	2	40	40
	~	6	10	1,9	2,5	50	45
	Λ	5	15	2,1	3	60	50
	П	4	30	2,2	3,5	70	55
	~	3	35	2,3	4	80	60
	Λ	2	45	2,4	4,5	90	65
	П	1	55	2,5	5	100	70
	~	0,5	70	2,6	5,5	110	75
	Λ	0,1	80	2,7	1	120	80
	П	0,05	90	2,8	1,5	130	85
	~	0,01	100	2,9	2	150	95

Примітка: П – прямокутний сигнал; ~ – гармонічний сигнал; Λ – трикутний сигнал.

Розташувати сигнали на екрані осцилографа у відповідності з рекомендаціями.

Практичне заняття 2. Вимірювання напруги та струму

Електронні вольтметри і амперметри. Включення вольтметрів та амперметрів у електричне коло. Вплив внутрішнього опору вимірювального пристрою на роботу кола у якому здійснюється вимірювання.

2.1 Теоретичні відомості. Включення вольтметрів у електричне коло

Для запобігання впливу внутрішнього опору вимірювального пристрою на роботу пристроїв у яких проводяться вимірювання необхідно щоб вольтметр мав великий вхідний опір, а амперметр – дуже малий. Розглянемо як буде впливати вхідний опір на результати вимірювання і на роботу пристроїв.

Вимірювання напруги. На рис. 1 наведена схема підключення вольтметра до джерела сигналу з внутрішнім опором R_i . Вхідний опір вольтметра позначений як $R_{вх}$.

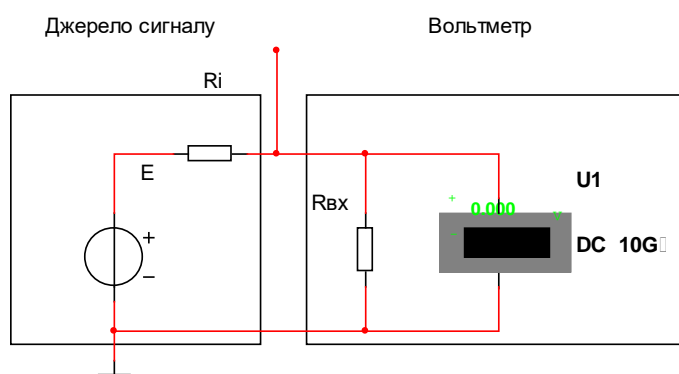


Рис. 2.1. Еквівалентна схема з'єднання джерела сигналу та вольтметра

Джерело ЕРС (електрорушійної сили) має нульовий внутрішній опір. Вхідний опір вольтметра постійного струму U1 (знаходиться в бібліотеці Indicator) $R_{вхU1}$ задано рівним 10 Гом. Оскільки $R_{вхU1}$ дуже велике то його можна не враховувати при розрахунках.

Розрахуємо напругу на виході джерела сигналу $U_{вих}$ при під'єднанні до нього вольтметра з вхідним опором $R_{вх}$.

$$U_{вих} = iR_{вх} = \frac{E}{R_i + R_{вх}} \cdot R_{вх}.$$

Задамо $R_{вх} = 1 \text{ МОм}$, $R_i = 10 \text{ кОм}$, $E = 12 \text{ В}$ і розрахуємо напругу $U_{вих}$:

$$U_{вих} = \frac{12}{10^4 + 10^6} \cdot 10^6 = 11,99 \text{ В}.$$

Виміряємо при заданих параметрах напругу $U_{вих}$ за допомогою моделювання. Модель для дослідження наведена на рис. 2.2.

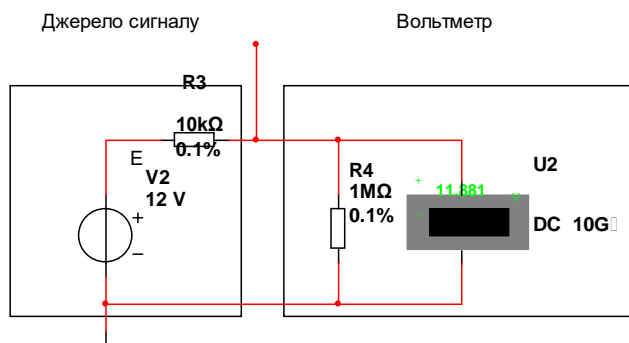


Рис. 2.2. Модель для вимірювання напруги $R_i = 10 \text{ кОм}$

Розрахуємо абсолютну та відносну похибки вимірювання. Абсолютна похибка дорівнює:

$$\Delta X = X - X_i = E - U_{\text{вих}} = 12 - 11,88 = 0,12 \text{ В.}$$

Відносна похибка дорівнює:

$$\delta = \frac{\Delta X}{X_d} = \frac{\Delta X}{E} = \frac{0,12 \text{ В}}{12 \text{ В}} = 0,01.$$

У відсотках відносна похибка дорівнює 1%.

Проаналізуємо як зміниться абсолютна та відносна похибки при збільшенні внутрішнього опору R_i до 100 кОм.

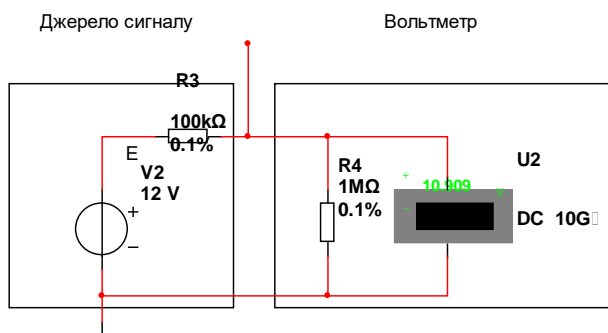


Рис. 2.3. Модель для вимірювання напруги при $R_i = 100 \text{ кОм}$

Розраховані абсолютна та відносна похибки вимірювання для цього випадку дорівнюють $\Delta X = 1,091 \text{ В}$, а відносна – 9,1%.

Спробуємо розрахувати відносну похибку вимірювань через внутрішній опір джерела та вхідний опір вольтметра:

$$\delta = \frac{R_i}{R_i + R_{\text{вх}}} = \frac{100}{1100} \cdot 100\% = 9,1\%.$$

Виходячи з цього, можна зробити висновок, що для отримання заданої похибки необхідно щоб вхідний опір вольтметра був не меншим ніж $R_{вх} \geq R_i/\delta$.

Перевіримо це співвідношення. Нехай внутрішній опір джерела сигналу дорівнює 100 кОм, а похибка не повинна перевищувати 2%. Тоді $R_{вх} \geq R_i/\delta = 100 \text{ кОм}/0,02 = 5 \text{ МОм}$.

2.2 Включення амперметрів у електричне коло

Амперметри включаються в розрив електричного кола і тому, щоб не впливати на загальний опір кола, і, як слідство, на струм у колі, необхідно мати внутрішній опір амперметра як можна меншим.

На рис. 2.4 наведена схема включення амперметра у коло.

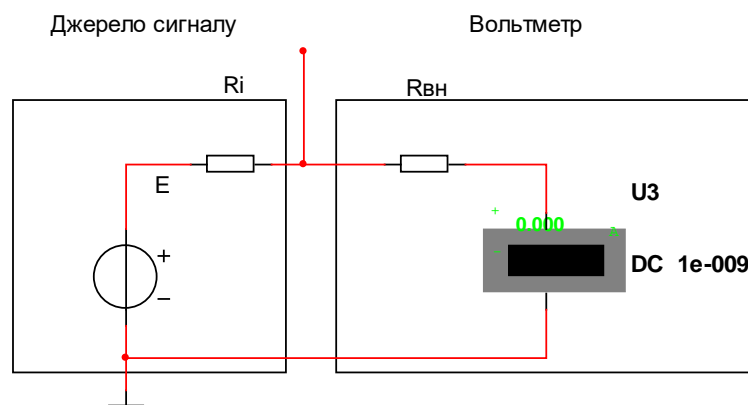


Рис. 2.4. Еквівалентна схема з'єднання джерела сигналу та амперметра

Оскільки внутрішній опір цифрового амперметра дорівнює $1 \cdot 10^{-9}$ Ом, то його можна не враховувати. Струм у колі на рис. 2.4 нескладно розрахувати за формулою:

$$i = E / (R_i + R_{вн}).$$

Задамо $R_{вн} = 1$ Ом, $R_i = 10$ кОм, $E = 12$ В і розрахуємо напругу струм i :

$$i = 12 / (10000 + 1) = 0,0012 \text{ А}.$$

Абсолютна похибка при таких значеннях опорів дорівнює $1,19 \cdot 10^{-7}$ А, тобто приблизно 12 мкА при значенні струму 1,2 мА. Відносна похибка дорівнює:

$$\delta = (12 \cdot 10^{-6} / 1,2 \cdot 10^{-3}) \cdot 100\% = 1\%.$$

Чим більшим буде значення відношення $R_i/R_{\text{вн}}$ тим менше буде похибка вимірювань. Розрахувати потрібне значення $R_{\text{вн}}$ можна за формулою:

$$\delta = \frac{R_{\text{вн}}}{R_i + R_{\text{вн}}} = \frac{1}{10000} \cdot 100\% = 1\%.$$

2.3 Завдання для самостійної роботи

1. Зібрати модель (рис. 2.5) і встановити параметри компонентів у відповідності до даних, наведених у табл. 2.1.

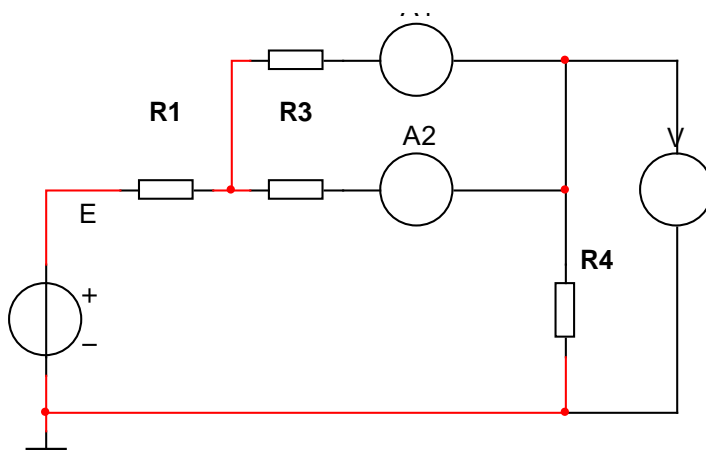

































Рис. 2.5. Модель для дослідження

На рис. 2.5 буквою E позначено джерело сигналу (постійної або змінної напруги), буквами A – амперметри, буквою V – вольтметр.

2. Розрахувати внутрішній опір вольтметра та амперметра для того, щоб відносна похибка вимірювання не перевищувала задану в таблиці.
3. Розрахувати абсолютну та відносну похибки вимірювання при вимірюванні струмів та напругу.
4. Результати вимірювання занести в таблицю і розмістити у звіті.
5. Розмістити у звіті скріншоти з результатами вимірювання і моделлю з встановленими параметрами.

Таблиця 2.1. Завдання на практичне заняття 2

№ вар.	Джерело сигналу	Значення напруги E, В	Відносна похибка вимірювання, %	Амперметр	Вольтметр	R1, кОм	R2, кОм	R3, кОм	R4, кОм
1.	DC_Power	10	0,5	мультиметр		120	13	47	11
2.	AC_VOLTAGE	2	1			270	27	18	15
3.	DC_Power	9	2		мультиметр	180	30	56	6,8
4.	AC_VOLTAGE	3	0,5		мультиметр	91	82	33	47
5.	DC_Power	8	1			82	75	68	56
6.	AC_VOLTAGE	4	2	мультиметр		75	68	62	51
7.	DC_Power	7	0,5	мультиметр		68	62	56	47
8.	AC_VOLTAGE	5	1			62	56	51	39
9.	DC_Power	1	2		мультиметр	56	51	47	36
10.	AC_VOLTAGE	1	0,5		мультиметр	51	47	39	33
11.	DC_Power	3	1			47	39	36	30
12.	AC_VOLTAGE	3	2	мультиметр		39	36	33	27
13.	DC_Power	5	0,5	мультиметр		36	33	30	24
14.	AC_VOLTAGE	0,5	1			33	30	27	21
15.	DC_Power	10	2		мультиметр	30	27	24	18
16.	AC_VOLTAGE	2	0,5		мультиметр	27	24	21	210
17.	DC_Power	9	1			24	21	18	270
18.	AC_VOLTAGE	3	2	мультиметр		21	18	210	300
19.	DC_Power	8	0,5	мультиметр		18	210	270	75
20.	AC_VOLTAGE	4	1			210	270	300	68
21.	DC_Power	7	2		мультиметр	270	300	75	470
22.	AC_VOLTAGE	5	0,5		мультиметр	300	75	91	56
23.	DC_Power	1	1			330	68	68	51

Зберегти файл звіту і моделі з ім'ям Пр2_Прізвище_гр.ms10 та Пр2_Прізвище_гр.docx, де гр. – учбова група.

Практичне заняття 3. Вимірювання амплітудно-частотних характеристик

3.1 Теоретичні відомості

Під час практичного заняття потрібно буде виміряти амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) двох кіл. Це паралельний та послідовний коливальний контур.

На рис. 3.1 наведена схема коливального контуру з урахуванням опору втрат. Втрати енергії виникають тому, що котушка виготовляється з проводу, а він має опір на якому розсіюється тепло при протіканні через нього струму. А у конденсаторі виникають втрати через неідеальність діелектрика між обкладинками.

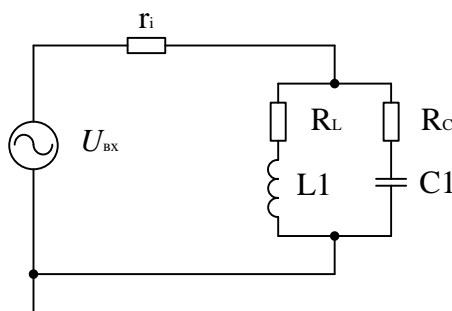


Рис. 3.1. Схема паралельного коливального контуру

На схемі втрати в котушці індуктивності і конденсаторі позначені як R_L і R_C , а внутрішній опір джерела сигналу як r_i .

Частотна характеристика такого кола, виміряна між точкою з'єднання резисторів та загальним проводом, має вигляд наведений на рис. 3.2.

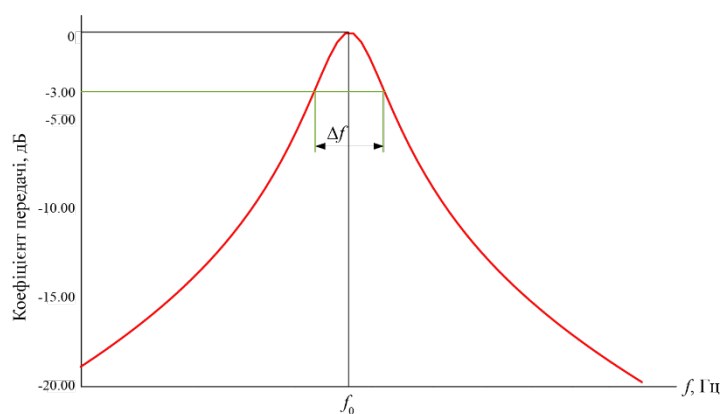


Рис. 3.2. АЧХ паралельного коливального контуру

Частота, на якій спостерігається максимум коефіцієнта передачі називається частотою резонансу і знаходиться за формулою

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Окрім резонансної частоти, ще одним важливим параметром є добротність контуру, яка знаходиться як відношення центральної частоти до смуги пропускання контуру на рівні -3 дБ (рис. 3.2)

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f}.$$

На рис. 3.3 наведені амплітудно-частотні характеристики коливальних контурів з різною добротністю і однаковою резонансною частотою.

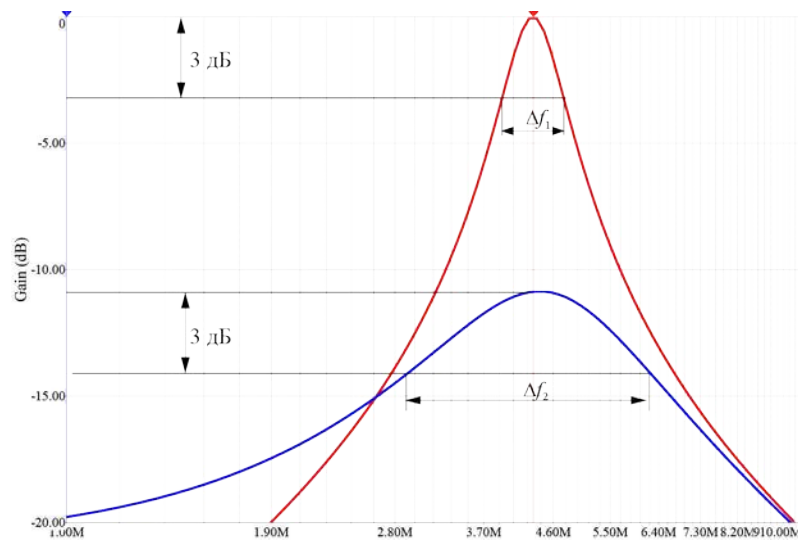


Рис. 3.3. АЧХ паралельних контурів з різною добротністю і однаковою резонансною частотою

З рис. 3.3 слідує, що добротність контуру з синьою АЧХ набагато менша ніж добротність контуру з червоною АЧХ. Так як $\Delta f_2 > \Delta f_1$, то

$$Q_1 = \frac{f_0}{\Delta f_1} > Q_2 = \frac{f_0}{\Delta f_2}.$$

3.2 Завдання для самостійної роботи

3.2.1 Підготовка моделі для досліджень

Зібрати модель, що наведена на рис. 3.4. Встановити параметри, наведені в таблицях 3.2 (ДВ-91) та 3.3 (ДГ-91) для Вашого варіанту. На схемі (рис. 3.4) наведено 2 коливальних контури:

- L_1C_1 – паралельний коливальний контур;
- L_2C_2 – послідовний коливальний контур.

Резистори R2 та R4 імітують втрати у контурі. Тобто вони впливають на добротність. Чим більше енергії виділяється на резисторі, тим менша добротність контуру.

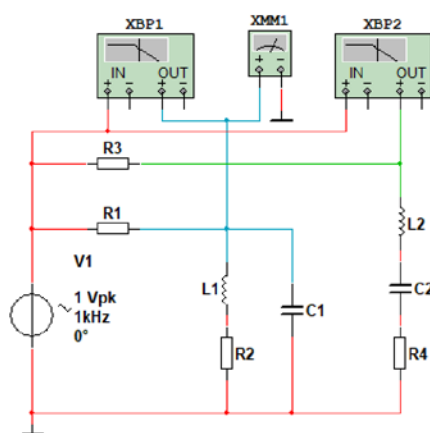


Рис. 3.4. Модель для дослідження

Обидва контури мають однакові частоти резонансу. Добротність послідовного коливального контуру розраховується аналогічно добротності паралельного контуру, але відлік 3 дБ здійснюється від мінімального рівня АЧХ (рис. 3.5).

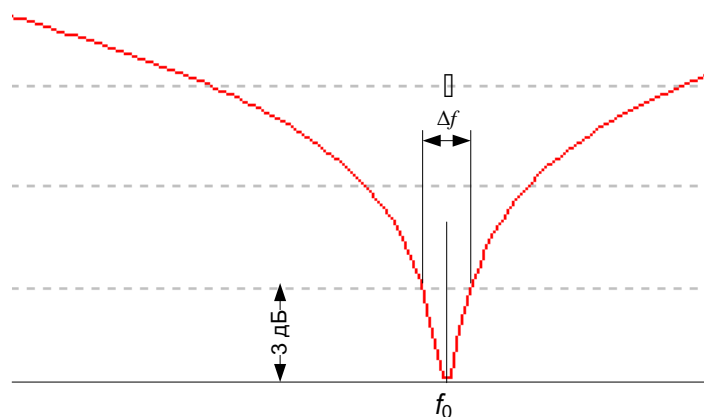


Рис. 3.5. АЧХ послідовного коливального контуру

3.2.2 Вимірювання АЧХ та розрахунок добротності

3.2.2.1 Вимірювання АЧХ за допомогою мультиметра

Виміряти АЧХ паралельного коливального контуру за допомогою мультиметра. Для цього попередньо розрахувати частоту резонансу, щоб знати на якій частоті буде пік АЧХ. Вимірювання здійснювати у дБ. Результати вимірювань занести в таблицю. Для вимірювання АЧХ змінюйте частоту генератора (не змінюючи амплітуду сигналу) і для кожного значення частоти вимірюйте рівень напруги на виході.

Таблиця 3.1. Амплітудно частотна характеристика паралельного коливального контуру

f , кГц									
U , дБ									

Одиниці вимірювання частоти (Гц, кГц, МГц) обираєте виходячи зі своєї частоти резонансу. Кількість точок вимірювання обираєте самі так, щоб не пропустити максимум. Мінімальне значення напруги на виході кола повинно бути у 30 (або більше) разів менше ніж напруга на резонансній частоті. Тобто діапазон частот обираєте самостійно.

Побудувати графік АЧХ. По горизонтальній осі обрати лінійний масштаб, а по вертикалі логарифмічний (у дБ).

У звіті навести схему моделі з вашими параметрами та надіслати модель для перевірки.

3.2.2.2 Вимірювання АЧХ за допомогою Бode-плоттера

Виміряти АЧХ паралельного та послідовного коливальних контурів за допомогою Бode-плоттерів. Для паралельного контуру знайти точні значення частоти праворуч та ліворуч від резонансної частоти (за допомогою спливаючого меню) на рівні -3 дБ від рівня на частоті резонансу. Знайти точне значення частоти резонансу. Якщо крива АЧХ має вигляд, який показано на рис. 3.6,а, то треба збільшити кількість точок на графіку. При кількості точок 500 графік має вигляд, який наведено на рис. 3.6,б.

Записати дані і розрахувати добротність контуру.

Навести скріншоти результатів вимірювання на частоті резонансу, та на частотах з рівнем -3 дБ відносно рівня на частоті резонансу.

Аналогічні вимірювання зробити для послідовного контуре за допомогою програми Grapher.

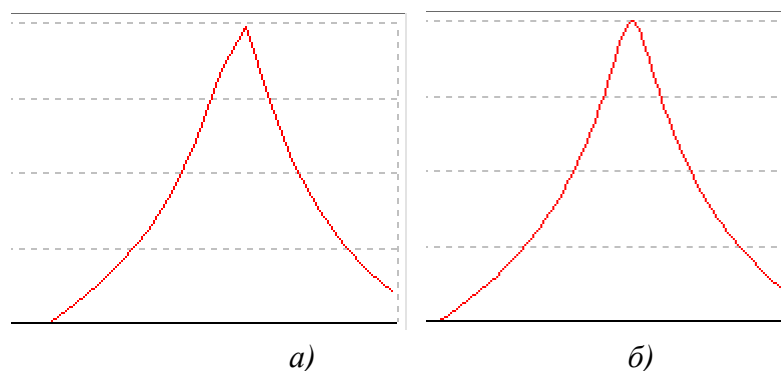


Рис. 3.6. Вигляд АЧХ при недостатній кількості точок вимірювання (а) та при кількості точок 500 (б)

Для точного вимірювання АЧХ за допомогою Бode-плоттера обирайте діапазон частот біля центральної (резонансної) частоти таким чином, щоб крива займала всю чи майже всю ширину екрану Бode-плоттера.

Таблиця 3.2. Завдання на практичне заняття 3

№ варіанту	R1, кОм	R2, Ом	R3, кОм	R4, Ом	$L_1 = L_2$, мкГн	$C_1 = C_2$, пФ
1.	1	10	1	10	510	82
2.	1,1	15	1,1	15	470	91
3.	1,2	20	1,2	20	430	100
4.	1,3	27	1,3	27	410	120
5.	1,5	30	1,5	30	390	130
6.	1,6	36	1,6	36	360	150
7.	1,8	39	1,8	39	330	160
8.	2	43	2	43	300	180
9.	2,1	47	2,1	47	270	200
10.	2,4	51	2,4	51	240	220
11.	2,7	56	2,7	56	220	240
12.	3	62	3	62	210	270
13.	3,3	68	3,3	68	200	300
14.	3,6	75	3,6	75	160	330
15.	3,9	82	3,9	82	150	360
16.	4,3	91	4,3	91	130	390
17.	4,7	100	4,7	100	110	430
18.	5,1	110	5,1	110	100	510
19.	0,91	10	0,91	10	91	620
20.	0,82	30	0,82	30	82	680
21.	0,75	51	0,75	51	75	750
22.	0,68	75	0,68	75	68	820
23.	0,62	82	0,62	82	62	910

3.4 Звіт з практичного заняття

У звіті навести схему моделі з заданими у Вашому варіанті параметрами, результати вимірювань АЧХ та розрахунки добротностей.

Графік АЧХ, побудований за результатами вимірювань мультиметром.

Графіки АЧХ виміряних Боде-плоттером та результати вимірювання частоти з обох боків від частоти резонансу на рівнях -3 дБ відносно рівня на резонансній частоті.

Відповісти на контрольні питання.

До звіту додати діючу модель.

Зберегти файл звіту і моделі з ім'ям Пр3_Прізвище_гр.ms10 та Пр3_Прізвище_гр.docx, де гр. – учбова група.

3.5 Контрольні питання

1. З яких причин на практиці частіше використовують логарифмічні одиниці вимірювання напруги та потужності?
2. Що таке добротність коливального контуру та від чого вона залежить?
3. Як точно виміряти рівень сигналу на заданій частоті при вимірювання Боде-плоттером?
4. Як точно виміряти частоту при заданому рівні сигналу?

Практичне заняття №4. Вимірювання спектру сигналів за допомогою аналізатора спектру Spectrum Analyzer

4.1 Теоретичні відомості

Спектром сигналу називається сукупність гармонійних коливань, з яких можна скласти сам сигнал.

Розрізняють два види спектральних діаграм (спектрів):

- спектр амплітуд;
- спектр фаз.

У спектрі амплітуд відображаються всі складові зі своїми амплітудами й частотами. У спектрі фаз відображаються всі складові зі своїми початковими фазами й частотами. Любий сигнал має одну спектральну діаграму амплітуд і одну спектральну діаграму фаз, у складі яких може втримуватися безліч складових. Надалі **спектральну діаграму будемо йменувати просто спектром** амплітуд або фаз.

Незалежно від того, який спектр (амплітуд або фаз), він зображується у вигляді ліній – його складових. У спектрі амплітуд висота спектральної лінії дорівнює амплітуді складової сигналу, а в спектрі фаз – початковій фазі складової. Причому у спектрі амплітуд всі складові мають позитивні значення, а в спектрі фаз як позитивні, так і негативні. Якщо амплітуда спектральної складової має негативний знак, то в спектрі амплітуд вона береться по модулі, а в спектрі фаз знак складовій змінюється на протилежний.

Для вимірювання спектрів сигналів використовуються аналізатори спектру. У складі віртуальних приладів Multisim є пристрій для аналізу спектру: аналізатор спектру (Spectrum Analyzer). На рис. 4.1 наведено позначення та робоче вікно Spectrum Analyzer.

На рис. 4.2 наведено призначення органів управління аналізатором спектра. Перед проведенням аналізу необхідно задати параметри спектрального аналізу: діапазон частот аналізу (Span), початкову і кінцеву частоти (Start і End), центральну частоту (Center), динамічний діапазон аналізу (Range), який задається як ціна ділення по вертикалі у В/ділення або дБ/ділення, опорний рівень в дБ, що відображається на екрані зеленою лінією, і роздільну здатність аналізу (Resolution Freq.). Число точок спектрального аналізу, максимальний рівень вхідного сигналу і джерело синхросигналу (внутрішній або зовнішній) задають при натиснутій кнопці Set.

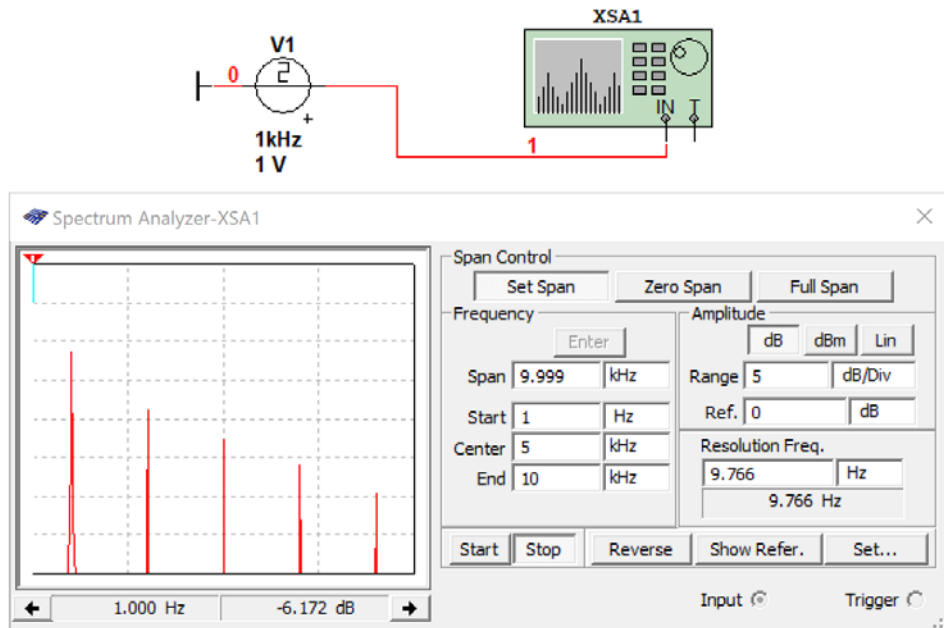


Рис. 4.1. Позначення та робоче вікно Spectrum Analyzer

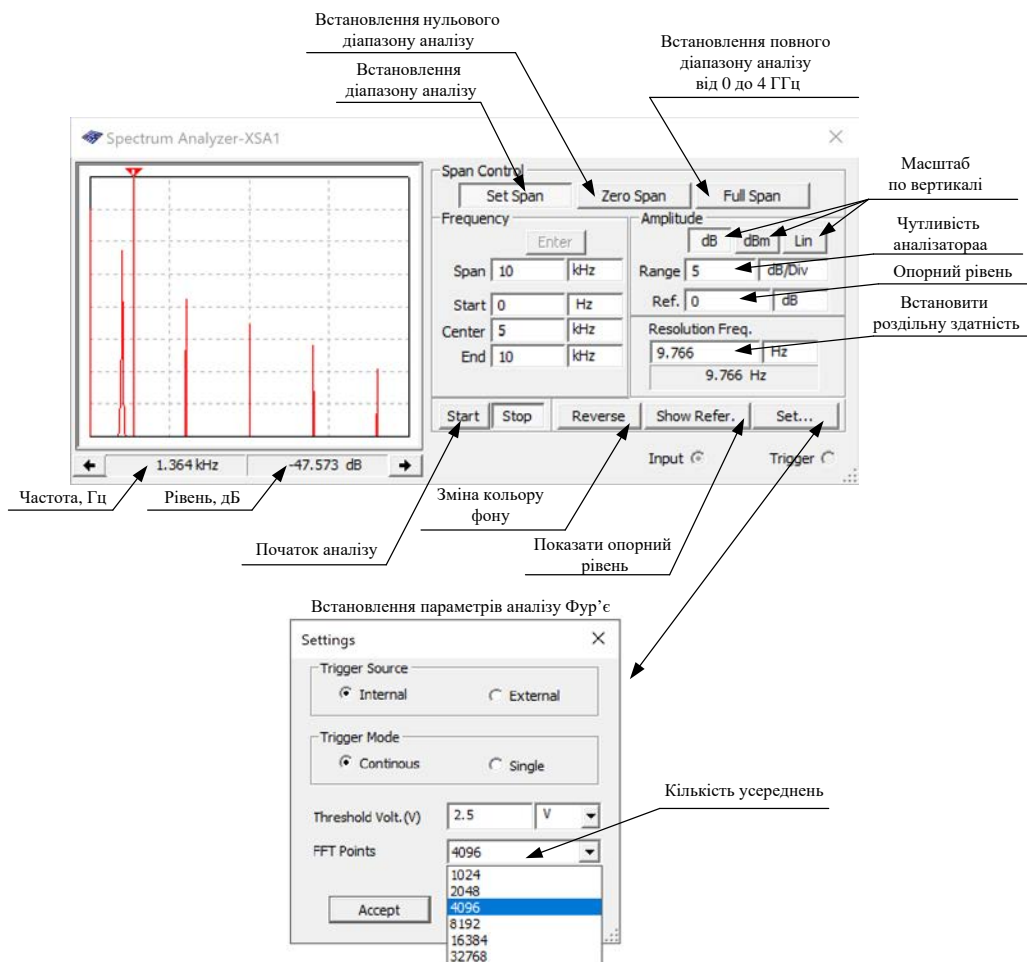


Рис. 4.2. Призначення органів управління аналізатором спектра

Налаштування діапазону частотного аналізу

Якщо відома основна частота сигналу, спектр якого потрібно дослідити, то можна початкову частоту задати рівною 0, а верхню частоту аналізу взяти у 10 разів більшою. Це дозволить проаналізувати 9 гармонік сигналу. Якщо потрібно дослідити більше ніж 9 гармонік, то відповідно задається верхня частота. У віконці End потрібно вписати максимальне значення частоти. Таке ж значення треба вписати у віконце **Span**. Після цього **обов'язково натиснути кнопку Enter**. В результаті автоматично з'явиться значення середньої частоти діапазону і аналізатор запам'ятає встановлені значення.

Якщо частота сигналу невідома, то краще натиснути кнопку Full Span, а після завершення аналізу встановити потрібний діапазон. Чим вужче діапазон частот аналізу, тим точніше можна знайти спектральні складові сигналу. Пояснимо це нижче.

Встановлення роздільної здатності по частоті

Чим менше значення частоти встановлене у віконці **Resolution Freq.**, тим точніше буде вимірюватись спектр. Величина роздільної здатності залежить не тільки від діапазону частот аналізу, але і від значення **FFT Points** – кількості усереднень. Цифровий спектральний аналіз за допомогою перетворення Фур'є здійснюється над коротким фрагментом сигналу (реалізацією). Це призводить до низької точності аналізу. Щоб підвищити точність проводять велику кількість вимірювань на коротких фрагментах сигналів і потім роблять усереднення результатів. Чим більше таких вимірювань, тим вище точність аналізу спектру.

Мінімальна кількість **FFT Points** 1024 (рис. 4.2), а максимальна – 32768. Чим більше це значення, тим більше часу потребує аналіз. Можна провести аналіз з числом точок усереднення 1024, а якщо спектр буде недостатньо інформативним, то збільшити їх кількість.

Встановивши кількість точок (по замовчуванню 1024) треба вписати у віконце **Resolution Freq.** як можна менше значення, наприклад 1 Гц. Програма автоматично розрахує мінімальне значення роздільної здатності, яке з'явиться у віконці **Resolution Freq.**

Масштаб по вертикалі можна встановити у процесі вимірювання таким чином, щоб максимальна складова спектру була максимально наближена до верхнього краю вікна. Масштаб лінійний чи логарифмічний теж можна задавати у процесі вимірювання.

Після встановлення цих параметрів треба натиснути кнопку **Start**.

Переглянути результати аналізу можна і у вікні Grapher (рис. 4.3). Скориставшись курсорами можна детально дослідити рівень спектральних складових як у вікні спектроаналізатора, так і у вікні Grapher.

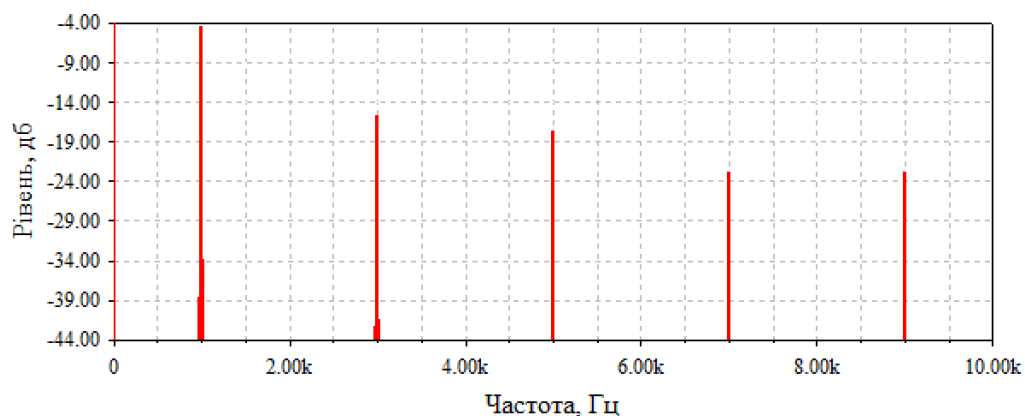


Рис. 4.3. Перегляд результатів спектрального аналізу у вікні Grapher

4.2 Завдання для самостійної роботи

Виміряти спектр прямокутних імпульсів (рис. 4.4) з частотою слідування 5 кГц при двох різних тривалостях імпульсів:

- 50% від тривалості періоду (Duty Cycle дорівнює 50);
- 5% від тривалості періоду (Duty Cycle дорівнює 5).

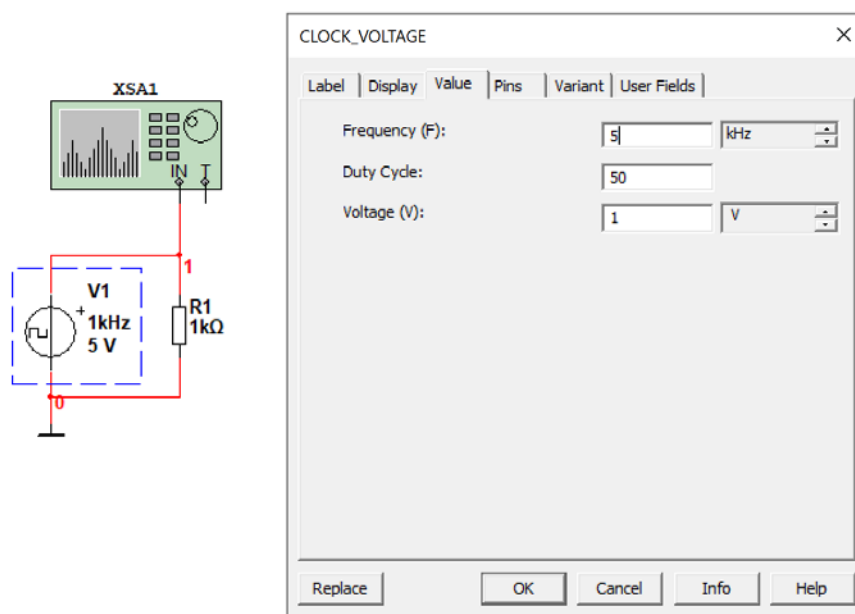


Рис. 4.4. Модель для дослідження спектру

Для тривалості 5% провести вимірювання при кількості точок усереднення 1024 та 8192. При кожному вимірюванні встановити максимальну роздільну здатність (мінімальне значення у Resolution Freq.).

Навести скріншоти результатів вимірювання на екрані Spectrum Analyzer. Для тривалості імпульсу 5% від періоду додатково навести скріншот вікна Grapher.

Відповісти на контрольні питання. Зробити висновки.

Зберегти файл звіту і моделі з ім'ям Пр4_Прізвище_гр.ms10 та Пр4_Прізвище_гр.docx, де гр. – учбова група.

Контрольні питання

1. Чим відрізняються спектри симетричних та несиметричних сигналів?
2. Чи впливає відношення тривалості імпульсу до тривалості періоду на характер спектру послідовності прямокутних імпульсів?
3. Від чого залежить точність вимірювання спектру при використанні аналізатора спектру?
4. Чи впливає смуга аналізу на точність вимірювання спектру?
5. Як знайти точне значення рівня першої гармоніки сигналу?
6. Як знайти точне значення 5-гармоніки сигналу?

Практичне заняття №5. Вимірювання амплітудних характеристик електронних пристроїв

5.1 Теоретичні відомості

Під амплітудною характеристикою мають на увазі залежність напруги на виході пристрою від напруги на його вході. Тобто $U_{\text{вих}} = f(U_{\text{вх}})$. Приклад амплітудної характеристики наведений на рис. 5.1.

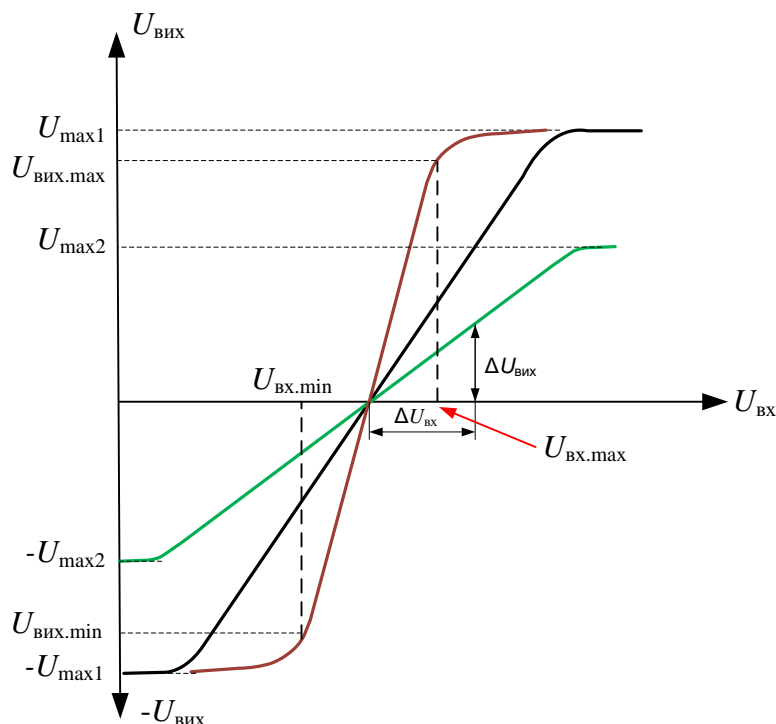


Рис. 5.1. Приклади симетричних амплітудних характеристик відносно осі $U_{\text{вх}}$

Амплітудна характеристика дозволяє:

- з'ясувати максимальну і мінімальну напругу на виході пристрою;
- з'ясувати максимальну і мінімальну напругу на вході пристрою;
- знайти коефіцієнта передачі пристрою.

Під максимальною і мінімальною напругою на виході пристрою будемо вважати напругу що формується на лінійній ділянці амплітудної характеристики ($U_{\text{вих.max}}$ та $U_{\text{вих.min}}$), там де спотворення форми сигналу або відсутні, або мінімальні. Вплив нелінійності амплітудної характеристики на коефіцієнт нелінійних спотворень розглянемо трохи пізніше.

Значення U_{max} і $-U_{\text{max}}$ показують абсолютний максимум напруги на виході пристрою. Але при таких значеннях вихідної напруги коефіцієнт нелінійних спотворень може сягати декількох десятків процентів.

Коефіцієнт передачі це відношення вихідної напруги пристрою до його вхідної напруги –

$K_{\text{пер}} = U_{\text{вих}}/U_{\text{вх}}$. Якщо $K_{\text{пер}} > 1$, то це підсилювач напруги, якщо $K_{\text{пер}} = 1$, то це повторювач напруги і при $K_{\text{пер}} < 1$ – послаблювач напруги (може бути активним пасивним).

Знаючи амплітудну характеристику неважко знайти коефіцієнт передачі, який дорівнює $K_{\text{пер}} = \Delta U_{\text{вих}}/\Delta U_{\text{вх}}$ (рис. 5.1).

Амплітудні характеристики можуть бути симетричними відносно обох осей, як показано на рис. 5.2. В пристроях з такими характеристиками як на вході, так і на виході напругу може приймати як позитивні так і негативні значення.

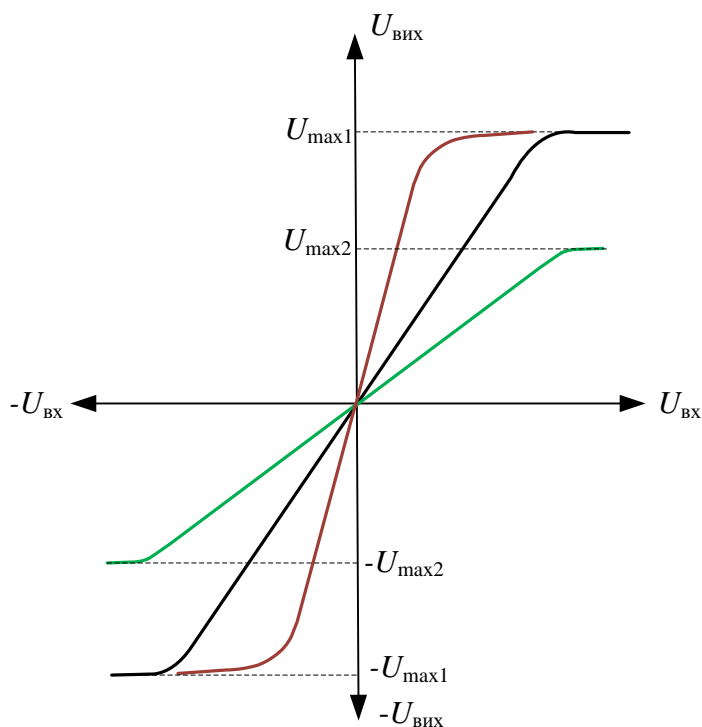


Рис. 5.2. Симетричні амплітудні характеристики відносно осей $U_{\text{вх}}$ і $U_{\text{вих}}$

Однак амплітудні характеристики можуть бути і тільки в області або позитивної напруги (рис. 5.3), або негативної.

Як виміряти амплітудну характеристику? Можна методом генератора гармонічного сигналу та вольтметра. На вхід пристрою подають напругу, яка змінюється дискретно від 0 до $U_{\text{мах}}$. Для кожного вхідного значення вимірюється вихідна напруга. Коли напруга на виході при збільшенні вхідної напруги перестане зростати, то це означає що вже досягнуто значення $U_{\text{мах}}$. Залишається лише побудувати графік.

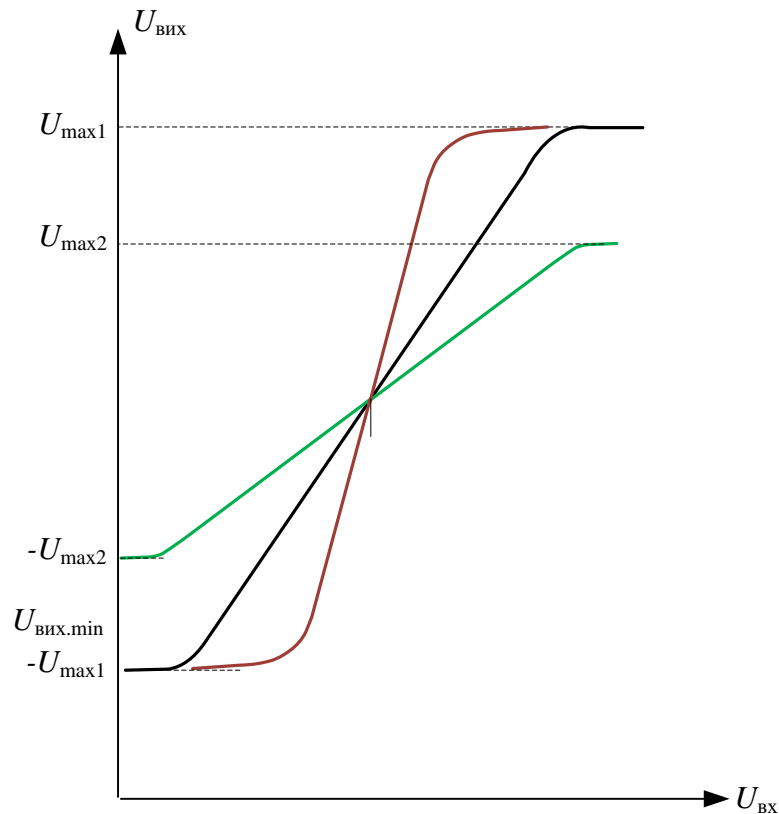


Рис. 5.3. Амплітудні характеристики в області позитивної напруги

Але такий шлях дуже трудомісткий. Задачу вимірювання можна спростити, якщо на вхід подати лінійно зростаючу напругу. Для цього можна використати функціональний генератор. Відобразити амплітудну характеристику можна за допомогою осцилографа, Модель, що реалізує такий спосіб вимірювання, показана на рис. 5.4.

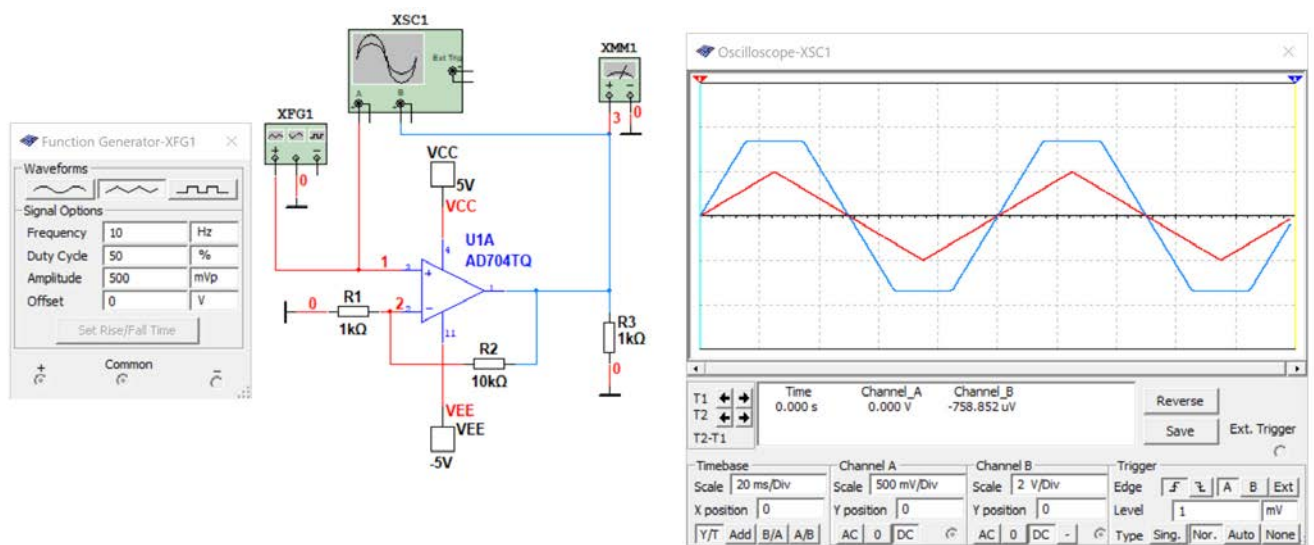


Рис. 5.4. Вимірювання амплітудної характеристики за допомогою функціонального генератора та осцилографа

5.2 Завдання для самостійної роботи

Виміряти амплітудну характеристику пристрою, наведеного на рис. 5.5 в двох положеннях перемикачів J1 та J2. Перший експеримент – перемикачі розімкнені, другий експеримент – перемикачі замкнені.

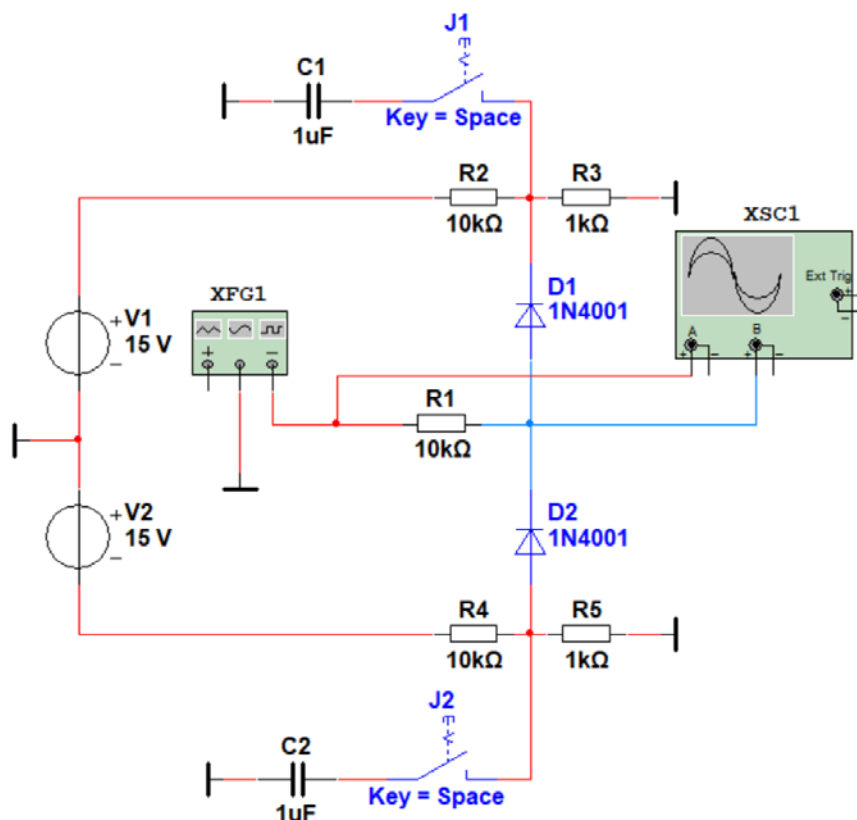


Рис. 5.5. Модель для дослідження амплітудної характеристики

Навести скріншоти результатів вимірювання для обох експериментів, на яких видно верхню та нижню межу амплітудної характеристики – U_{\max} і $-U_{\max}$. Знайти розмах амплітудної характеристики $\Delta U_{\text{ампл}} = U_{\max} - (-U_{\max})$. Виміряти верхню і нижню межу лінійної ділянки амплітудної характеристики на рівнях $0,05\Delta U_{\text{ампл}}$ і $0,95\Delta U_{\text{ампл}}$ від нижньої межі амплітудної характеристики (рис. 5.6).

Встановити номінали резисторів R2, R3, R4, R5 у відповідності з даними, наведеними у табл. 5.1.

Результати вимірювання представити не тільки на скріншотах, а і у текстовому вигляді.

Таблиця 5.1. Завдання на практичне заняття для гр. ДВ-91

№ варіанту	R2, кОм	R3, кОм	R4, кОм	R5, кОм
1.	120	13	47	11
2.	270	15	18	15
3.	180	30	56	6,8
4.	91	82	33	47
5.	82	75	68	56
6.	75	68	62	51
7.	68	62	56	47
8.	62	5,6	51	39
9.	56	5,1	47	36
10.	51	4,7	39	33
11.	47	3,9	36	30
12.	39	3,6	33	27
13.	130	33	30	24
14.	33	3	27	21
15.	30	27	24	18
16.	27	4	21	210
17.	24	21	18	270
18.	21	11	210	300
19.	180	91	270	75
20.	210	170	300	68
21.	270	100	75	470
22.	300	75	91	56
23.	330	68	68	51

Щоб відповісти на контрольні запитання і зробити висновки потрібно порівнювати опір ділянки напруги сигналу змінного струму частотою 1000 Гц без підключеного конденсатора і з підключеним конденсатором. У висновках пояснити чому змінюється форма амплітудної характеристики при підключенні конденсаторів та при їх відключенні.

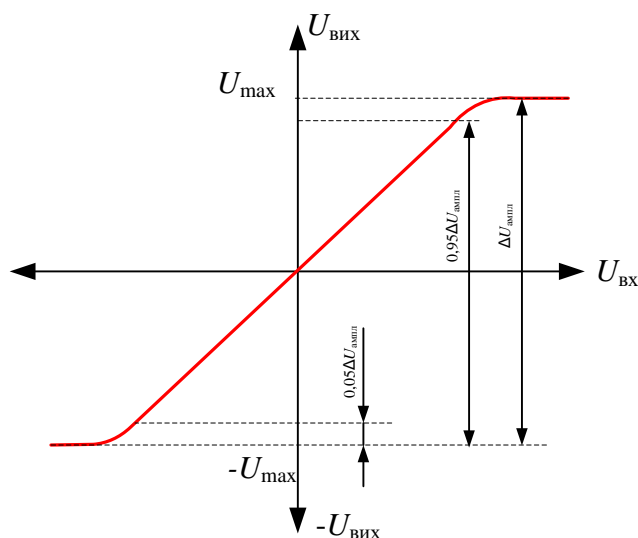


Рис. 5.6. Позначення для вимірювання амплітудної характеристики

Відповісти на контрольні питання. Зробити висновки.

Зберегти файл звіту і моделі з ім'ям Пр5_Прізвище_гр.ms10 та Пр5_Прізвище_гр.docx, де гр. – учбова група.

Контрольні питання

1. Яку залежність описує амплітудна характеристика?
2. Де потрібно обирати робочу точку на амплітудній характеристиці?
3. Чи залежить коефіцієнт нелінійних спотворень сигналу від амплітуди вхідного сигналу? Якщо залежить, то чому?
4. Чому при зміщенні робочої точки від оптимального положення зростають нелінійні спотворення?
5. Як виміряти амплітудну характеристику пристрою за допомогою осцилографа?
6. Як виміряти амплітудну характеристику пристрою за допомогою вольтметра?
7. Для чого використовують обмежувачі напруги?

Практичне заняття 6. Аналіз параметрів кіл при зміні параметрів елементів

6.1 Теоретичні відомості

Під час практичного заняття потрібно буде виміряти амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) двох кіл при зміні параметрів елементів контурів. Це паралельний та послідовний коливальний контур.

Розглянемо як автоматизувати процес вимірювання добротності коливального контуру за допомогою інструменту аналізу Multisim **Parameter Sweep** (рис. 6.1).

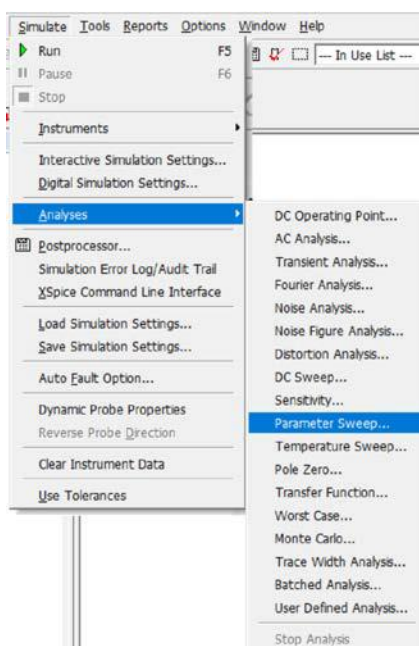


Рис. 6.1. Вибір інструменту аналізу Parameter Sweep

Модель для дослідження коливальних контурів наведені на рис. 6.2.

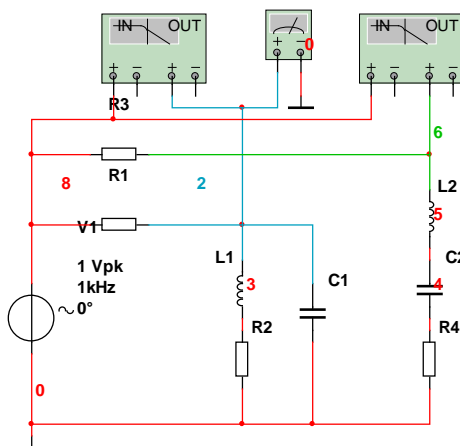


Рис. 6.2. Моделі коливальних контурів для аналізу Parameter Sweep

Спробуємо дослідити як впливає опір резистора R2 на добротність паралельного контуру. Для цього відкриваємо вікно аналізу Parameter Sweep (рис. 6.3).

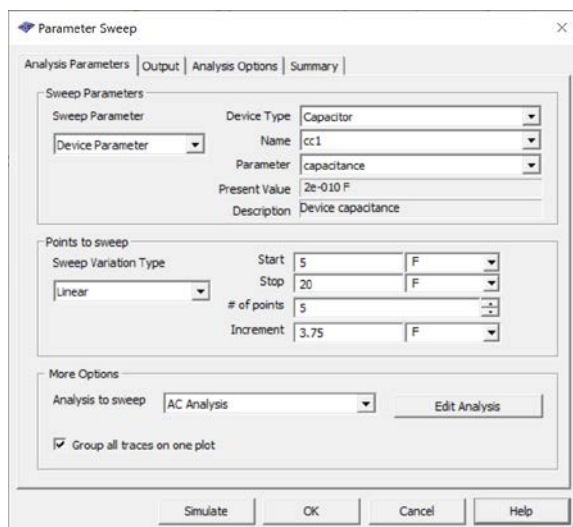


Рис. 6.3. Вкладка Analysis Parameters інструменту аналізу Parameter Sweep

У вкладці Analysis Parameters необхідно обрати тип елементу (Device Type) – резистор, а у віконці Name обрати rr2 (рис. 6.4), що відповідає резистору R2 на рис. 6.2.

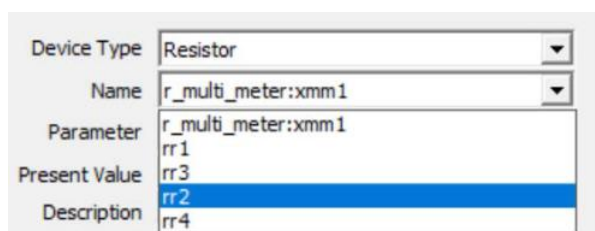


Рис. 6.4. Вибір потрібного елементу для аналізу

У вікні **Start** необхідно задати мінімальне значення опору резистора R2 ($10 - 0,05 \cdot 10$) Ом, а у вікні **Stop** максимальне значення ($10 + 0,05 \cdot 10$) Ом. Кількість точок аналізу задається у віконці **# of points**, а крок зміни опору **Increment** при аналізі встановлюється автоматично (рис. 6.5).

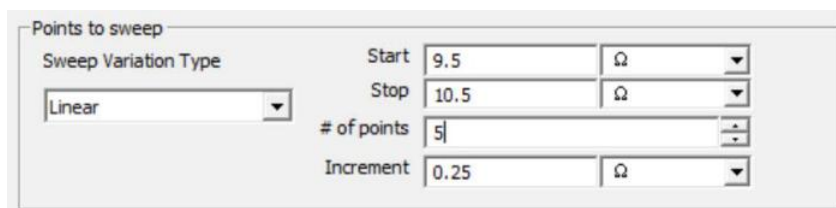


Рис. 6.5. Вибір діапазону зміни опору R2 та кількості точок для аналізу елементу для аналізу

По замовчуванню зміна параметрів елементів здійснюється по лінійному закону (Linear у віконці Sweep Variation Type). Можна обрати

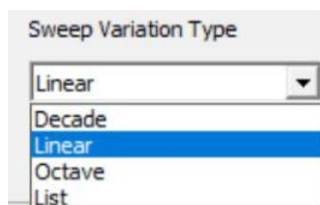


Рис. 6.6. Вибір закону зміни опору

Після цього потрібно обрати тип аналізу (рис. 6.7). Оскільки у прикладі досліджується вплив опору резистора на добротність контуру, то необхідно обрати AC Analysis.

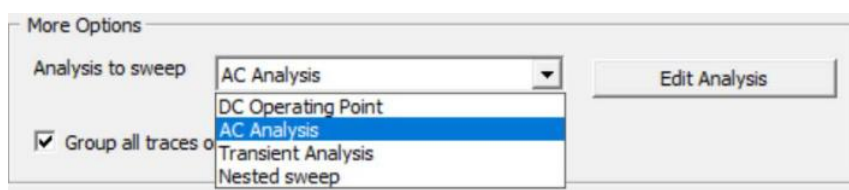


Рис. 6.7. Вибір типу аналізу

Після встановлення всіх параметрів вкладка Analysis Parameters приймає вигляд наведений на рис. 6.8.

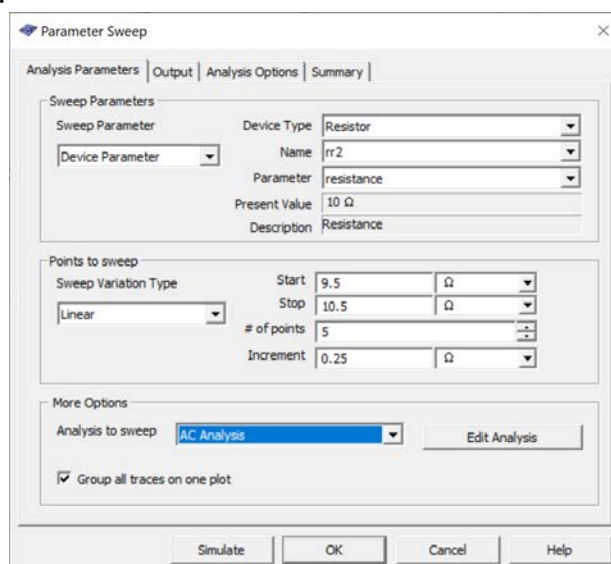


Рис. 6.8. Вкладка Analysis Parameters після встановлення всіх параметрів

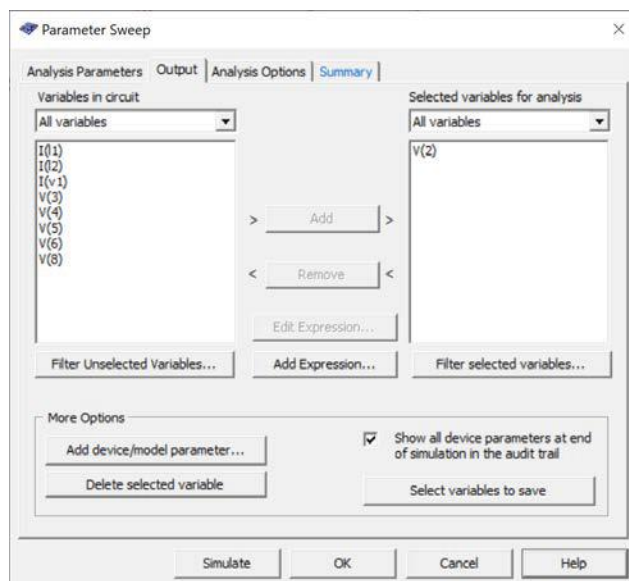


Рис. 6.9. Вкладка Output для вибору точки аналізу

Якщо більше нічого не змінювати, то отримаємо результат наведений на рис. 6.10.

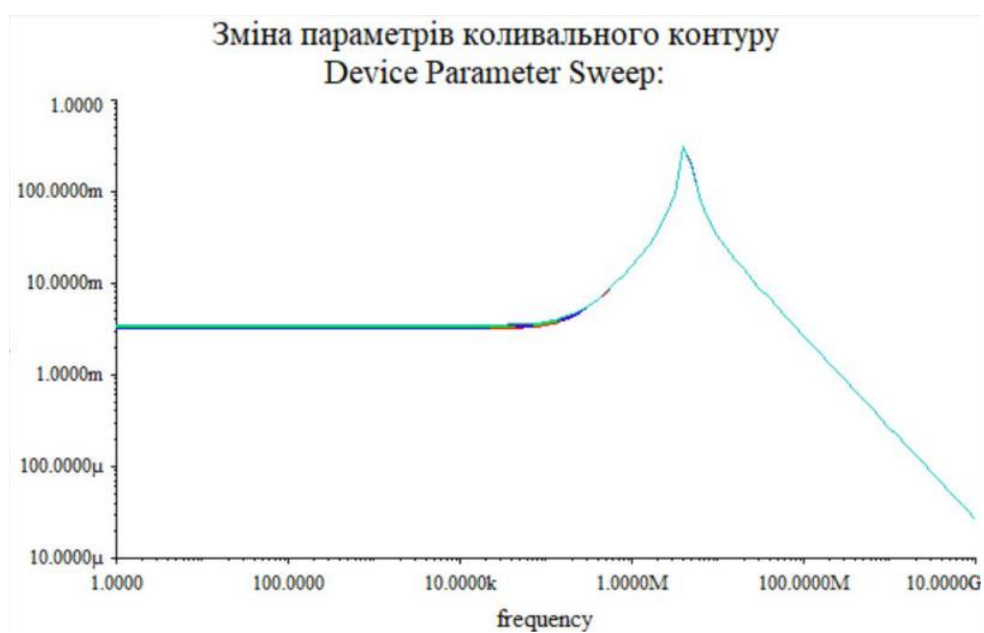


Рис. 6.10. АЧХ контуру з параметрами, встановленими по замовчуванню

Параметри AC Analysis по замовчуванню наведені на рис. 6.6.

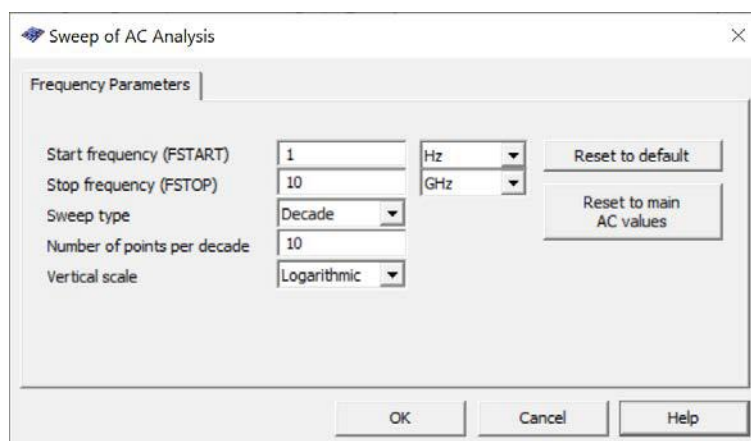


Рис. 6.6. Параметри встановлені по замовчуванню для AC Analysis

Результат, наведений на рис. 6.10, містить дуже мало інформації і можна зробити хибний висновок про те, що зміна опору резистора R2 практично не впливає на добротність контуру. Але це не так.

Для отримання потрібного результату потрібно звужити діапазон аналізу в межах $f_0 \pm \Delta f$, де f_0 – частота резонансу контуру, Δf – 10...15% від f_0 . Встановимо такі параметри на основі вимірювання АЧХ за допомогою Бодє-плоттера (рис. 6.2). Для паралельного контуру частота резонансу $f_0 = 4,3$ МГц. Встановимо діапазон аналізу від 3,7 МГц до 5 МГц (рис. 6.12).

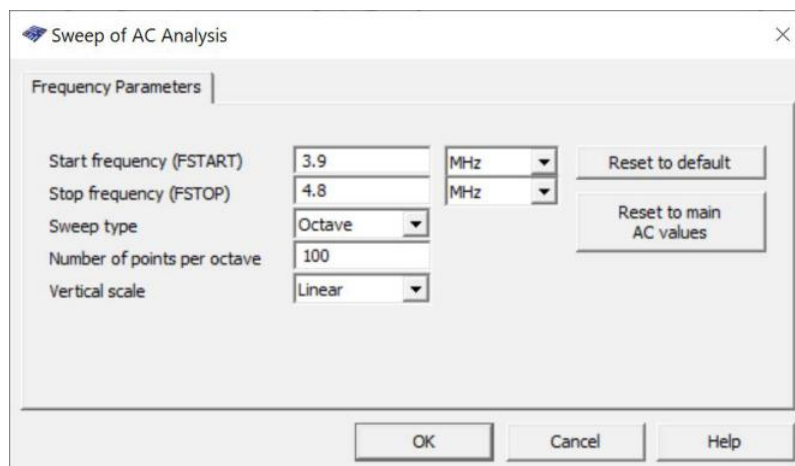


Рис. 6.12. Параметри аналізу по змінному струму коливального контуру

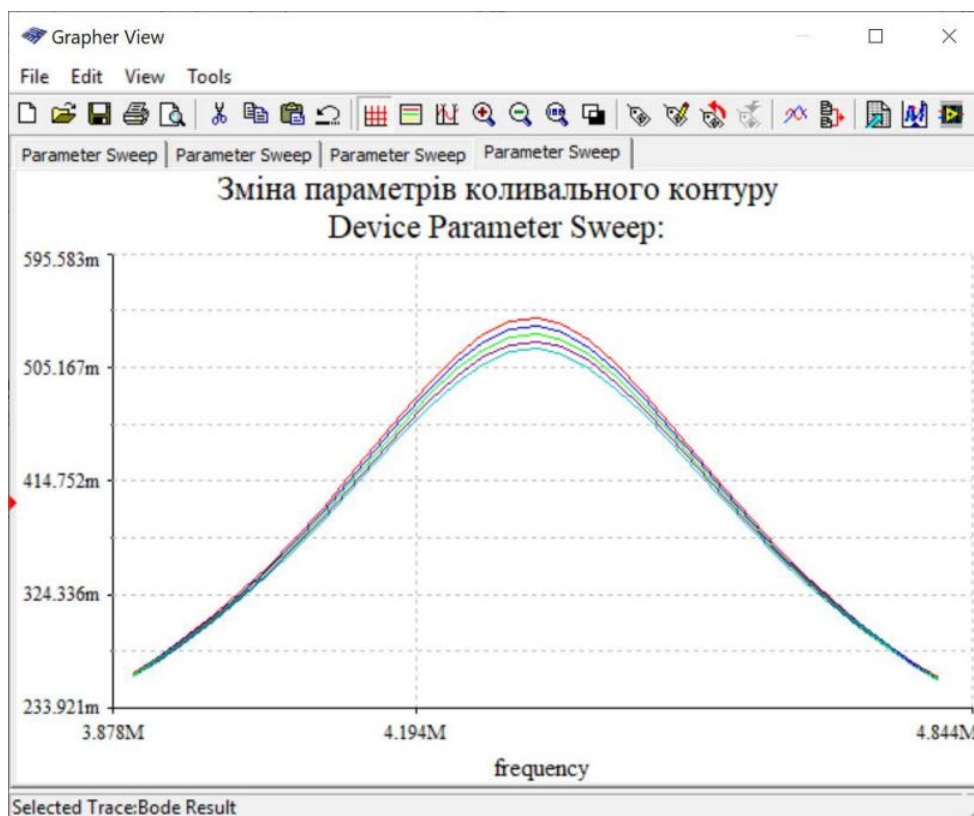


Рис. 6.13. Результати аналізу по змінному струму коливального контуру при зміні опору резистора R2 в діапазоні $\pm 5\%$

Розглянемо ще один приклад. Для цього використаємо послідовний коливальний контур з частотою резонансу 39,8 МГц. Проаналізуємо як зміна ємності конденсатора C2 буде впливати на частоту резонансу контуру. Параметри встановлені для аналізу впливу зміни ємності на частоту резонансу наведені на рис. 6.14, а параметри аналізу на змінному струмі – на рис. 6.15.

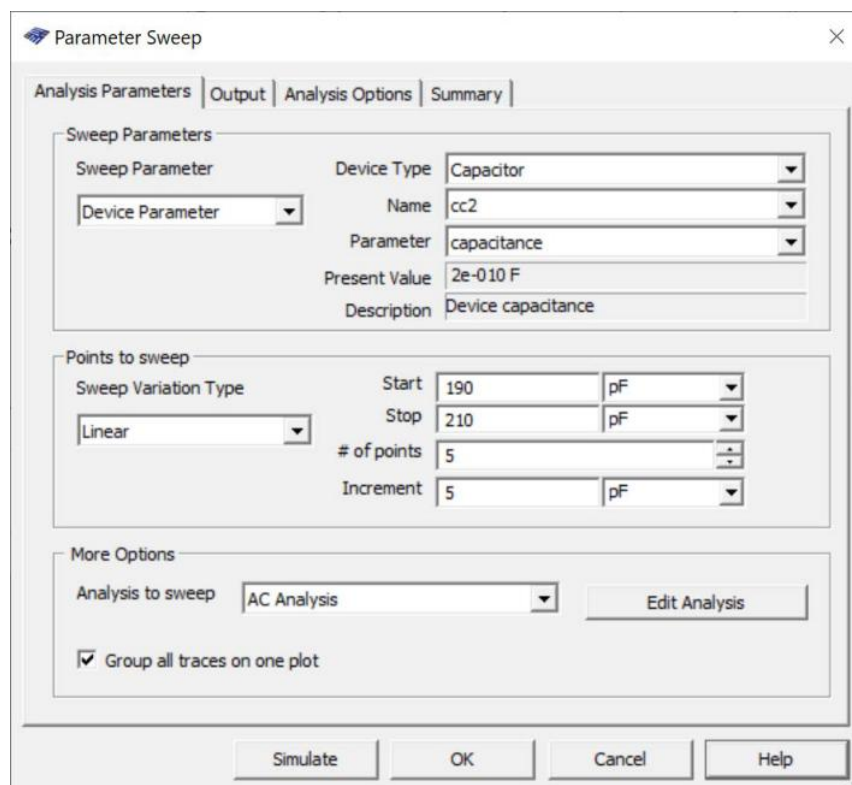


Рис. 6.14. Параметри аналізу Parameter Sweep при зміні ємності конденсатора C2

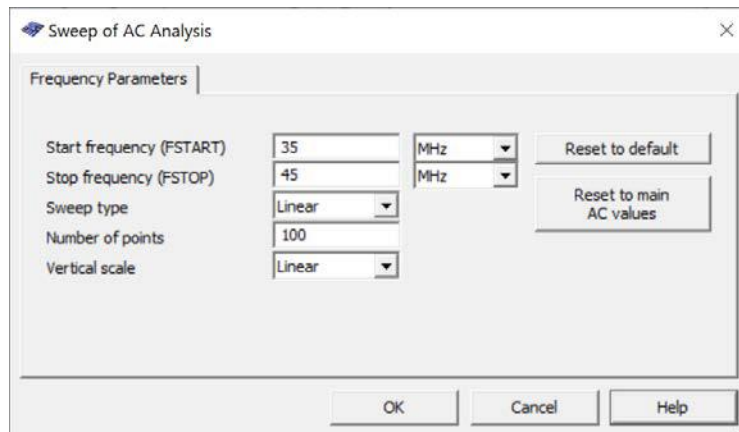


Рис. 6.15. Параметри аналізу на змінному струмі для Parameter Sweep при зміні ємності конденсатора C2

Результат аналізу АЧХ послідовного коливального контуру при зміні ємності конденсатора C2 наведений на рис. 6.16.

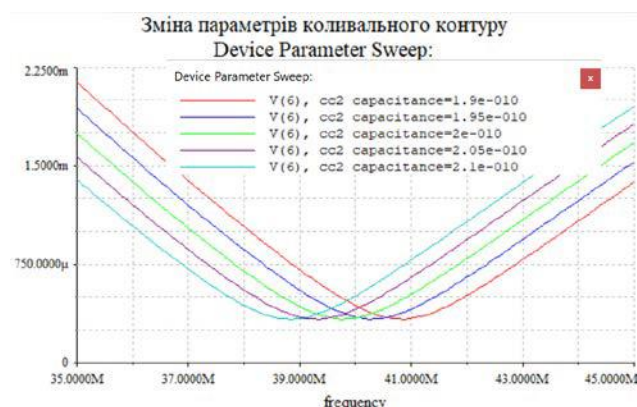


Рис. 6.16. Результат аналізу АЧХ послідовного коливального контуру при зміні ємності конденсатора C2

Якщо включити курсори у вікні Grapher, то можна виміряти значення частоти резонансу для кожного значення ємності C2.

6.2 Завдання для самостійної роботи

1. Встановити параметри елементів контурів у відповідності з даними варіанту наведеному у табл. 6.1.

2. Виміряти залежність добротності паралельного коливального контуру від опору резистора R2. Опір резистора R2 змінювати в діапазоні ± 20 відсотків від значення заданого в таблиці. Кількість точок аналізу не менше 5.

3. Виміряти залежність частоти резонансу послідовного коливального контуру від індуктивності L2. Індуктивність котушки індуктивності L2 змінювати в діапазоні ± 20 відсотків від значення заданого в таблиці. Кількість точок аналізу не менше 7.

4. Навести скріншоти результатів вимірювання з включеним відображенням легенди. Фон робочого вікна Grapher білий.

Зберегти файл звіту і моделі з ім'ям Пр5_Прізвище_гр.ms10 та Пр5_Прізвище_гр.docx, де гр. – учбова група.

Таблиця 6.1. Завдання на практичне заняття 6

№ варіанту	R1, кОм	R2, Ом	R3, кОм	R4, Ом	L ₁ = L ₂ , мкГн	C ₁ = C ₂ , пФ
24.	1	1,0	1	1,0	510	82
25.	1,1	1,5	1,1	1,5	470	91
26.	1,2	2,0	1,2	2,0	430	100
27.	1,3	2,7	1,3	2,7	410	120
28.	1,5	3,0	1,5	0,30	390	130
29.	1,6	3,6	1,6	0,36	360	150
30.	1,8	3,9	1,8	0,39	330	160
31.	2	4,3	2	0,43	300	180
32.	2,1	4,7	2,1	0,47	270	200
33.	2,4	5,1	2,4	0,51	240	220
34.	2,7	5,6	2,7	0,56	220	240
35.	3	6,2	3	0,62	210	270
36.	3,3	6,8	3,3	0,68	200	300
37.	3,6	7,5	3,6	0,75	160	330
38.	3,9	8,2	3,9	0,82	150	360
39.	4,3	9,1	4,3	0,91	130	390
40.	4,7	10,0	4,7	1,0	110	430
41.	5,1	11,0	5,1	1,1	100	510
42.	0,91	1,0	0,91	1,0	91	620
43.	0,82	3,0	0,82	3,0	82	680
44.	0,75	5,1	0,75	0,51	75	750
45.	0,68	7,5	0,68	0,75	68	820
46.	0,62	8,2	0,62	0,82	62	910

Контрольні питання

1. Чому виникає потреба проводити аналіз параметрів електричних кіл та пристроїв при зміні температури?
2. Чому виникає потреба проводити аналіз параметрів електричних кіл та пристроїв при зміні параметрів елементів?
3. Елементи з якого ряду номінальних значень мають найбільшу точність?
4. Для найбільшої відповідності параметрів пристроїв розрахованим значенням з якого ряду треба обирати резистори і чому?
5. За яким рядом треба обрати змінні резистори?
6. З якою точністю виготовляються резистори у рядах номінальних значень E12 та E24?
7. Чи залежить ємність конденсаторів від температури?
8. Яким чином можна виміряти параметри кіл чи пристроїв при зміні параметрів елементів цих кіл з мінімальними витратами часу?

Практичне заняття 7. Вимірювання опору

7.1 Теоретичні відомості

Під час практичного заняття потрібно ознайомитись з методами вимірювання опору.

7.1.1 Мостовий метод вимірювання опору

Мостові схеми постійного струму призначені для вимірювання активних опорів та неелектричних величин, а мостові схеми змінного струму – для вимірювання індуктивностей, взаємодуктивностей, ємностей, кута діелектричних втрат, добротності, частоти і неелектричних величин при наявності відповідних первинних вимірювальних перетворювачів.

Розглянемо мостовий метод вимірювання активного опору. На рис. 7.1 наведено схему моста постійного струму.

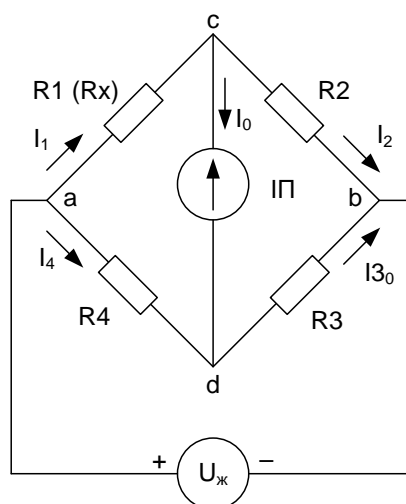


Рис. 7.1. Міст постійного струму

На рис. 7.1 резистори $R1 \dots R4$ – плечі моста; ab – діагональ моста, в яку подають напругу живлення від джерела постійної напруги $U_{\text{ж}}$; cd – діагональ у яку включають індикаторний пристрій (ІП). Це може бути як мікроамперметр, так і вольтметр.

Нульові показання ІР будуть при умові, коли струм $I_0 = 0$. Це можливо при умові що $I_1 = I_2$ та $I_4 = I_3$.

При виконанні такої умови напруга між точками c і d також дорівнює нулю $U_{cd} = 0$. Це можливо при умові, що напруга на резисторі $R1$ дорівнює напрузі на резисторі $R4$, а напруга $U_{R2} = U_{R3}$, а це значить що $I_1 R_1 = I_4 R_4$ та $I_2 R_2 = I_3 R_3$. З цього витікає, що

$$\frac{I_1 R_1}{I_4 R_4} = \frac{I_2 R_2}{I_3 R_3},$$

а оскільки $I_1=I_2$ та $I_4=I_3$, то $R_1/R_4 = R_2/R_3$. З цього витікають умови рівноваги моста

$$R_1 R_3 = R_2 R_4.$$

Для вимірювання невідомого опору замість резистора R_1 включають резистор R_x . Для того щоб зберегти баланс моста потрібно змінити або опір резистора R_2 або R_4 . Замість резистора R_4 або R_2 включають змінний резистор і змінюючи його опір добиваються рівноваги моста.

На рис. 7.2 наведено модель моста для вимірювання опору резисторів на постійному струмі.

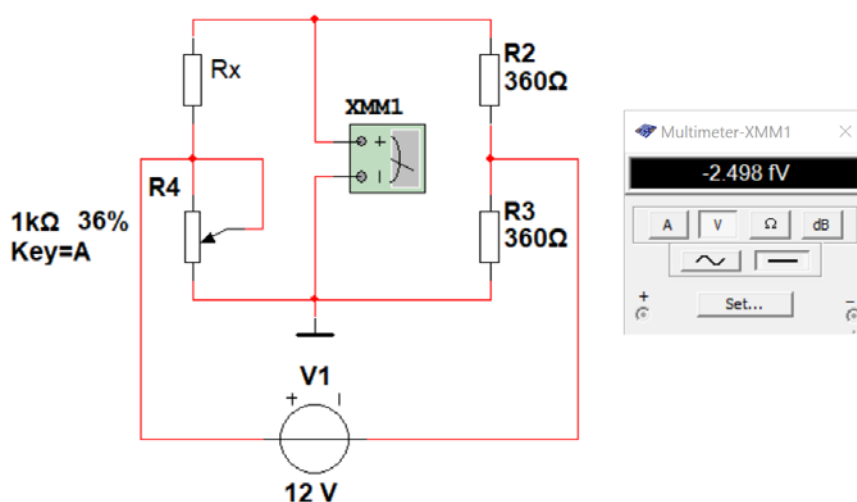


Рис. 7.2. Модель для вимірювання опору мостовим методом

Змінюючи опір резистора R_4 (при натисканні кнопки A при латинській розкладці клавіатури опір R_4 збільшується, а при натисканні комбінації клавіш $Shift+A$ – зменшується). Мультиметр на рис. 7.2 показує напругу $2,498 \cdot 10^{-15}$ В, тобто 2,498 фВ (фемтавольт). Можна вважати що міст збалансований. Опір резистора R_x дорівнює опору резистора R_4 . Значення опору нескладно розрахувати

$$R_4 = 1 \text{ кОм} \times 0,36 = 360 \text{ Ом},$$

0,36 це відсоток від повного опору R_4 (36% на рис. 7.2).

Як переконатися в тому, що міст збалансований? Треба змінювати опір резистора R_4 до тих пір, поки не отримаємо мінімальну напругу на мультиметрі. При подальшій зміні напруга знов почне зростати і потрібно повернути попереднє значення опору. Найзручніше починати

вимірювання або з нульового значення опору R4, або від максимального значення (тоді весь час його треба зменшувати до досягнення мінімуму показань мультиметра).

Точність встановлення опору резистора R4 встановлюється у вікні налаштування його параметрів (рис. 7.3). Треба двічі клацнути мишкою по зображенню резистора R4 щоб відкрити це вікно. У віконці **Increment** задається точність перебудови опору резистора R4. Якщо потрібно виміряти невідомий опір з точністю 1%, то Increment можна залишити 1%. Якщо треба точність 0,1%, то і інкремент повинен мати таке ж значення.

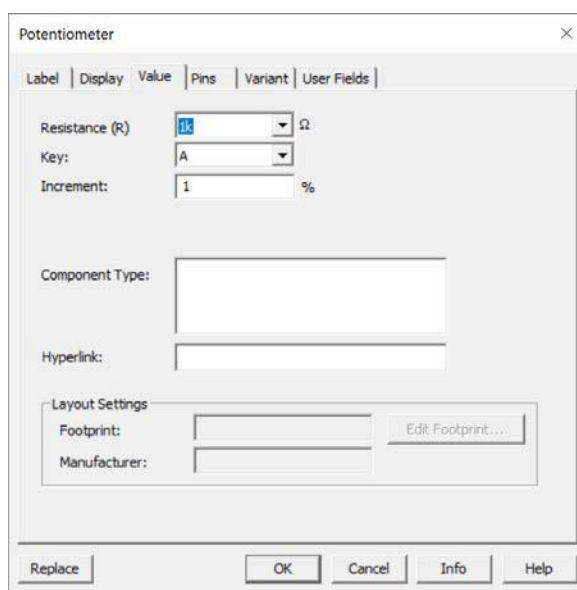


Рис. 7.3. Вікно встановлення параметрів змінного резистора

Якщо опір невідомого резистора більший ніж опір резистора R4, то балансу моста неможливо досягнути. У такому випадку використовують перемикачі діапазонів вимірювання. На рис. 7.4 наведено приклад моста для вимірювання опорів резисторів на двох діапазонах – до 1 кОм і до 10 кОм.

У верхньому положенні перемикача J1 діапазон вимірювання складає 1 кОм, у нижньому положенні – 10 кОм. З рис. 7.4 слідує що опір невідомого резистора складає 4,7 кОм (47% від 10 кОм).

Чи можна вимірювати опір менший ніж 1 кОм в діапазоні вимірювання 10 кОм. Можна. Але точність вимірювання буде у 10 разів меншою. Тому треба починати вимірювання з нижнього діапазону (1 кОм). А якщо не вдається збалансувати міст на цьому діапазоні, то перейти на діапазон 10 кОм.

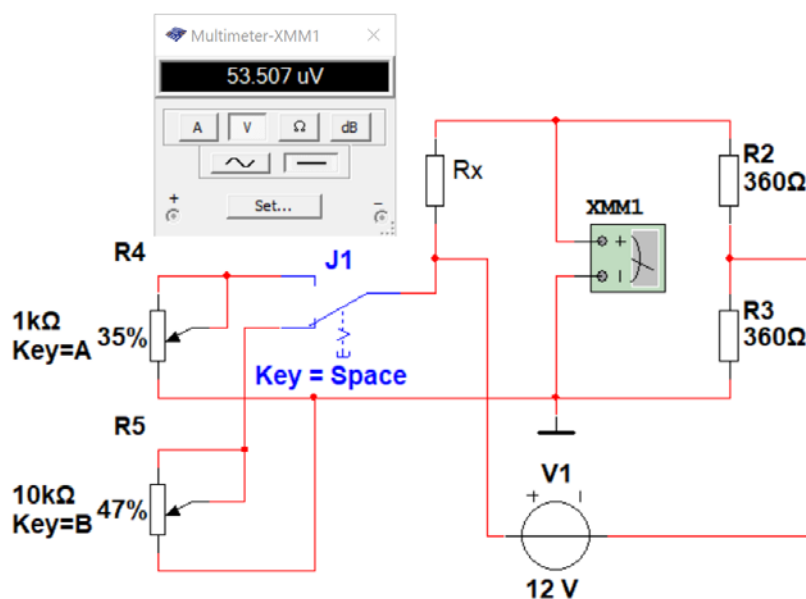


Рис. 7.4. Модель для вимірювання опору мостовим методом з двома діапазонами вимірювання

Кількість діапазонів і їх значення можна задавати.

Наприклад, при необхідності вимірювати опір у межах від 1 Ом до 1 МОм треба розбити весь діапазон вимірювання на 7 діапазонів: 1 Ом – 10 Ом – 100 Ом – 1 кОм – 10 кОм – 100 кОм – 1 МОм.

При вимірюванні малих значень опорів, щоб зменшити похибки від опору проводів що з'єднують міст з резистором, опір якого вимірюється, використовують більш складні подвійні мости.

7.1.2 Вимірювання опору з використанням джерела струму

Для вимірювання опору можна скористатися законом Ома. Оскільки напруга на резисторі дорівнює $U_R = IR$, то якщо знати величину струму то можна вимірявши напругу, що падає на резисторі, обчислити величину опору.

Функціональна схема для вимірювання опору таким методом наведена на рис. 7.5. Якщо обрати струм джерела кратний 10, то можна отримати показання вольтметра у значеннях опору, які пропорційні значенням вимірюваної напруги.

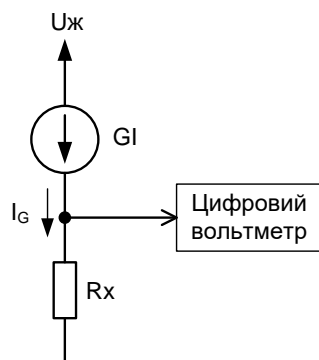


Рис. 7.5. Функціональна схема вимірювання опору за допомогою джерела струму

Розглянемо приклад. Нехай $R_x = 1 \text{ кОм}$. Якщо задати струм генератора I_G рівним 1 мА , то падіння напруги на резисторі склад $U_R = I_G R_x = 10^{-3} \cdot 10^3 = 1 \text{ В}$. Якщо при такому струмі підключити опір 10 кОм , то напруга на резисторі складе 10 В .

При струмі джерела 1 мкА можна вимірювати опір набагато більшого значення. Наприклад, при $R_x = 1 \text{ МОм}$, падіння напруги складе 1 В . Тобто достатньо змінювати струм джерела GI , а одиниці вимірювання замінити на Ом , кОм або МОм . Для того щоб вхідний опір вольтметра не впливав на результати вимірювання, потрібно щоб його значення було дуже великої величини. Вплив вхідного опору полягає у тому, що він під'єднується паралельно до вимірюваного опору, а це призводить до зменшення еквівалентного опору і зменшення показань вольтметра.

Розглянемо це на моделі, що наведена на рис. 7.6.

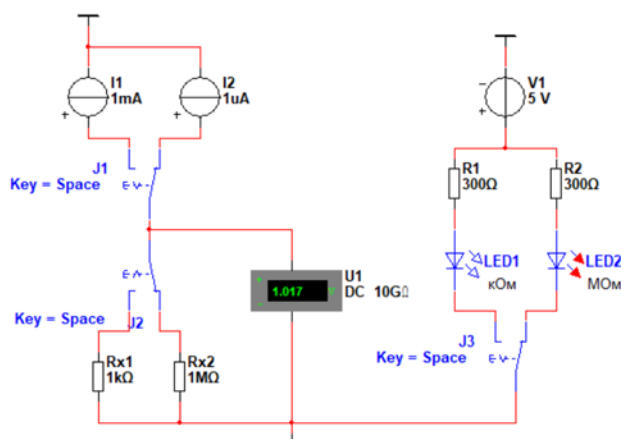


Рис. 7.6. Модель для вимірювання опору за допомогою джерела струму

Джерела струму I_1 і I_2 формують струм, який не залежить від опору резистора R_x . Вольтметр U_1 має вхідний опір 10 ГОм . Світлодіоди показують одиниці вимірювання у різних положеннях перемикачів $J_1 \dots J_3$ (всі перемикачі перемикаються одночасно при натисканні

клавіши **Пробіл** на клавіатурі). На рис. 7.6 показано вимірювання резистора Rx2 з опором 1 МОм. Включається світлодіод LED2, що відповідає значенню показань вольтметра у МОм.

На рис. 7.7 показано приклад вимірювання опору змінного резистора.

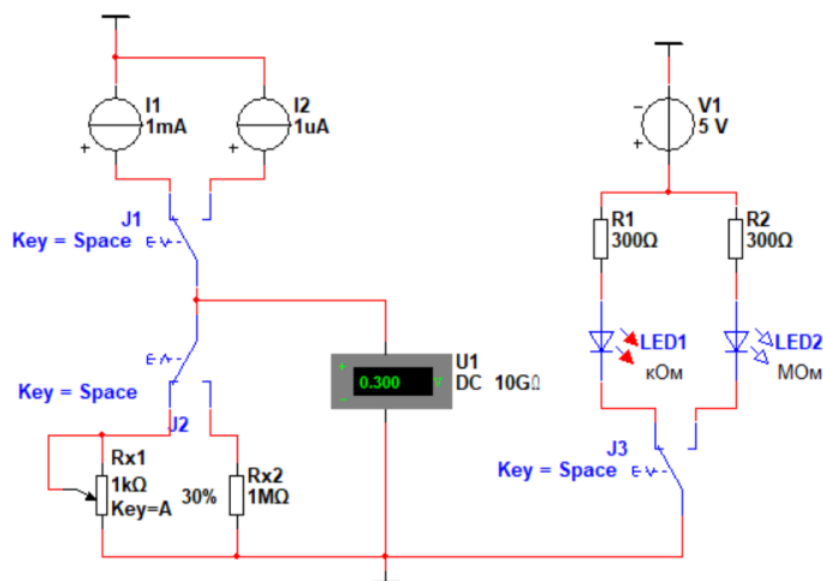


Рис. 7.7. Модель для вимірювання опору за допомогою джерела струму

Опір резистора Rx1 на рис. 7.7 дорівнює 300 Ом (30% від 1 кОм). Вольтметр показує 0,3 кОм. Одиниці вимірювання показує світлодіод LED1.

Для того щоб світлодіод включався потрібно мати джерело живлення і щоб через нього протікав струм 10 мА (рис. 7.8).

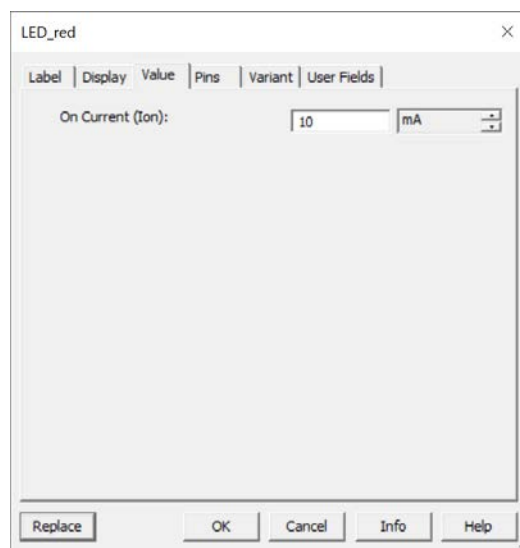


Рис. 7.8. Вікно налаштування параметрів світлодіода

Величину струму можна задати самостійно. Падіння напруги по замовчуванню на

світлодіоді дорівнює 2 В (це значення можна побачити у spice-моделі світлодіода). Для обмеження струму через світлодіод використовуються резистори R1 та R2. Розрахувати значення опору можна за формулою

$$R1 = \frac{U_{\text{ж}} - U_{\text{LED}}}{I_{\text{LED}}} = \frac{5 - 2}{10^{-3}} = 300 \text{ Ом.}$$

Якщо опір буде менший за потрібний, то світлодіод не включиться. А якщо більший, то це може призвести у реальних електронних пристроях (не у моделі) до виходу світлодіодів з ладу. На рис. 7.9 наведено схему моделі, що дозволяє вимірювати опір від одиниць Ом до десятків МОм.

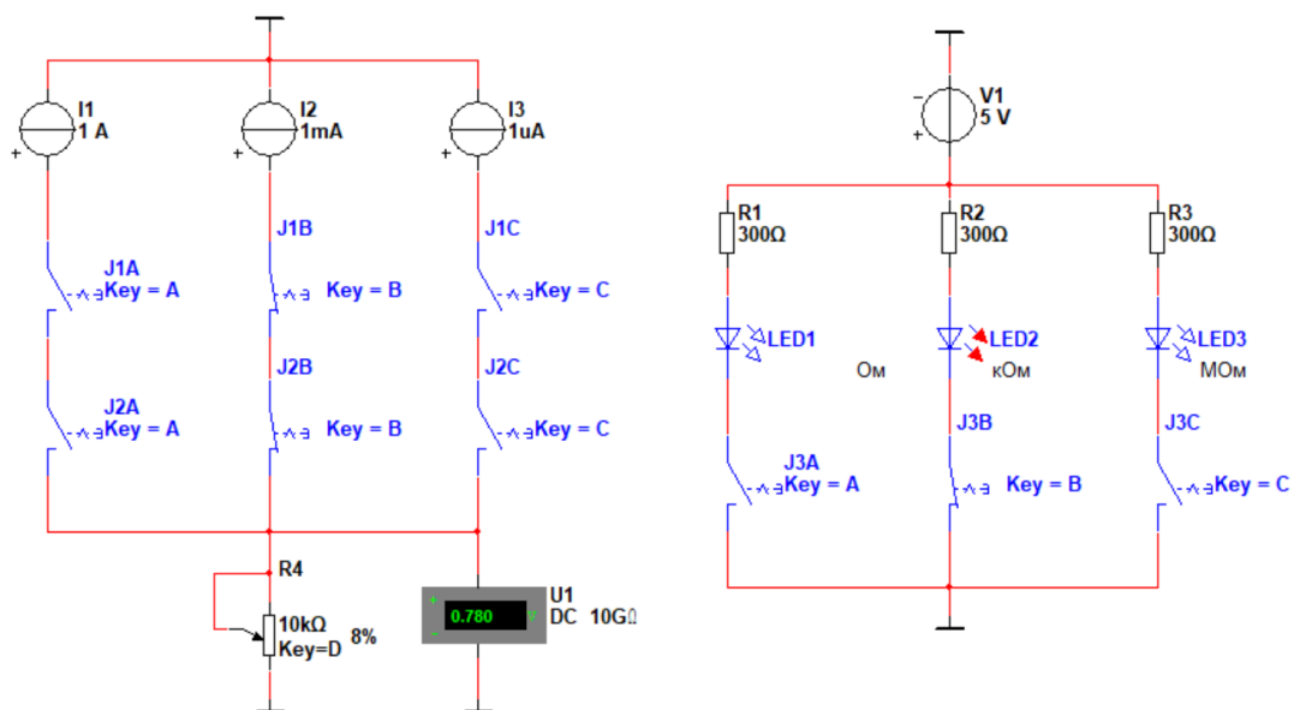


Рис. 7.9. Модель для вимірювання опору на трьох діапазонах

Перемикання діапазонів вимірювання здійснюється перемикачами J1...J3 після натискання клавіш А, В, С. У якості перемикачів використані DIPSW3. Збільшення опору змінного резистора R4 здійснюється клавішею D, а зменшення – комбінацією клавіш Shift + D.

6.2 Завдання для самостійної роботи

1. Виміряти мостовим методом сумарний опір резистора R_x та лампи розжарювання $X1$ у відповідності з даними наведеними у табл. 7.1 та 7.2. Для цього можна використати модель **Вимірювання опору резисторів мостовим методом_2 діапазони.ms10**.

2. Виміряти методом джерела струму опір того самого кола яке задане для першого завдання. Для цього можна використати модель **Вимірювання опору резисторів з джерелом струму і декількома діапазонами вимірювання.ms10**.

3. Встановити точність перебудови змінних опорів 0.1%.

4. Навести скріншоти з результатами вимірювання опорів для обох моделей. На скріншоті повинно бути видно модель і вольтметр з результатами вимірювань.

Зберегти файл звіту і моделі з ім'ям Пр5_Прізвище_гр.ms10 та Пр5_Прізвище_гр.docx, де гр. – учбова група.

Таблиця 7.1. Завдання на практичне заняття 7

№ варіанту	R_x , кОм	Лампа X1	№ варіанту	R_x , кОм	Лампа X1
1.	1	100V_100W	2.	3,3	28V_7.5W
3.	1,1	120V_100W	4.	3,6	30V_10W
5.	1,2	12V_10W	6.	3,9	4V_0.5W
7.	1,3	12V_25W	8.	4,3	5V_1W
9.	1,5	28V_7.5W	10.	4,7	100V_100W
11.	1,6	30V_10W	12.	5.1	120V_100W
13.	1,8	4V_0.5W	14.	0,91	12V_10W
15.	2	5V_1W	16.	0,82	12V_25W
17.	2,1	100V_100W	18.	0,75	28V_7.5W
19.	2,4	120V_100W	20.	0,68	30V_10W
21.	2,7	12V_10W	22.	0,62	4V_0.5W
23.	3	12V_25W	24.	3,3	28V_7.5W

Контрольні питання

1. При якій умові струм в діагоналі моста не протікає?
2. Якщо треба вимірювати дуже великі опори, то які вимоги висуваються до параметрів вольтметра? Велика чутливість? Великий вхідний опір?

3. Використовуючи закон Ома і контролюючи струм у колі з невідомим резистором (при фіксованій напрузі живлення) можна розрахувати опір резистора? Якщо можна, то Як?
4. До чого призведе малий внутрішній опір вольтметра при вимірюванні опору з використанням джерела фіксованого струму?
5. При вимірюванні великих значень опору струм джерела струму треба робити малим, чи великим? Наведіть відповідь на прикладі вимірювання опору 1 МОм.
6. Якщо цифровий вольтметр має точність вимірювання 3 знаки після коми, чи можна виміряти за допомогою нього опір 10 Ом при струмі джерела струму 1 мкА? Поясніть це.

Практичне заняття 8. Вимірювання індуктивності котушок

8.1 Теоретичні відомості. Вимірювання індуктивності шляхом вимірювання значення напруги

Як відомо, індуктивний опір котушки індуктивності дорівнює $x_L = 2\pi f_c$, де f_c – частота струму, що протікає через котушку. Якщо котушка має активний опір (на практиці це завжди виконується), то тоді комплексний опір котушки дорівнює $z_L = \sqrt{x_L^2 + R_L^2}$, де R_L – активний опір котушки індуктивності.

Принцип вимірювання індуктивності полягає в наступному. Через котушку індуктивності пропускають змінний струм і вимірюють напругу на котушці. Виміряна напруга в ідеальному випадку (котушка не має активного опору, тобто ідеальна) буде дорівнювати

$$U_L = 2\pi f_c L i_c = x_L i_c.$$

Знаючи напругу, величину струму та частоту сигналу, можна розрахувати значення x_L , а потім і значення індуктивності.

$$x_L = U_L / i_c,$$

а знаючи x_L можна розрахувати індуктивність $L = 1/2\pi f_c x_L$.

При наявності активного опору в котушці задача ускладнюється, бо потрібно виміряти значення активного опору. Активний опір можна виміряти пропустивши постійний струм через котушку. Індуктивний опір на постійному струмі дорівнює нулю. На рис. 8.1 наведена модель для вимірювання індуктивності методом вимірювання змінної напруги, що падає на котушці при пропусканні через неї змінного струму з відомими частотою та величиною.

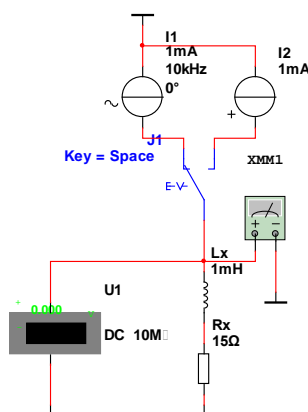


Рис. 8.1. Модель для вимірювання індуктивності методом вимірювання напруги з використанням джерела змінного

Модель містить два генератора струму:

- I1 – для вимірювання комплексного опору на змінному струмі;
- I2 – для вимірювання активного опору на постійному струмі.

Для зручності вимірювань використано два вимірювальних пристрої – вольтметр постійного струму U1 та мультиметр для вимірювання змінної напруги. Можна обійтись одним мультиметром. Однак при цьому доведеться перемикаєти вимірювання напруги змінного та постійного струму.

Проведемо дослід з цією моделлю. Спочатку виміряємо падіння напруги на котушці Lx на змінному струмі. Результат вимірювання наведений на рис. 8.2.

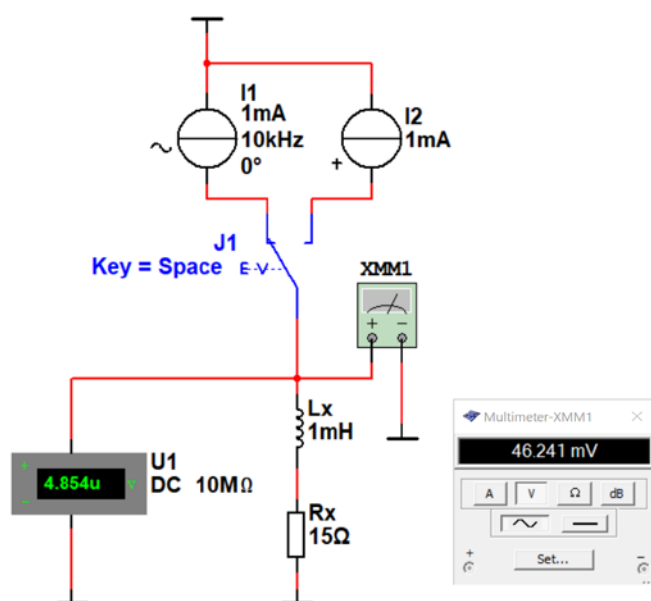


Рис. 8.2. Результат вимірювання падіння змінної напруги на котушці при частоті струму 10 кГц

Наступне вимірювання напруги зробимо при використанні генератора постійного струму. Результат вимірювання наведений на рис. 8.3.

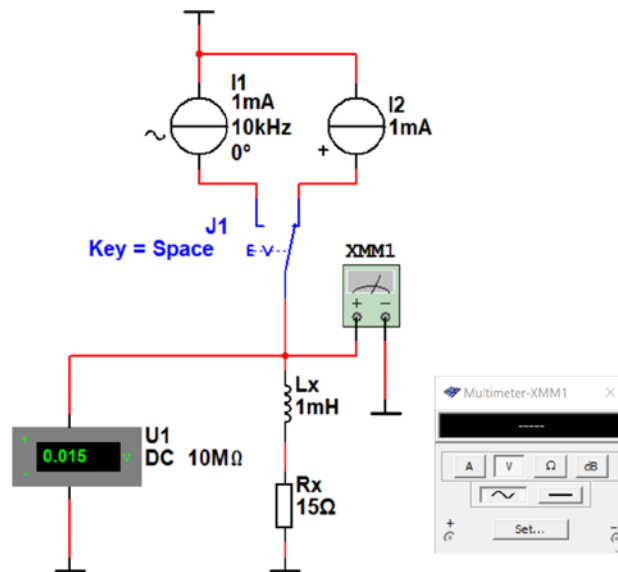


Рис. 8.3. Результат вимірювання падіння постійної напруги на котушці

За результатами вимірювання можемо записати значення виміряної напруги: $U_R = 15$ мВ, $U_{zLeф} = 46,24$ мВ на частоті 10 кГц. **Треба пам'ятати, що мультиметр вимірює ефективне значення напруги, а генератор формує струм, що заданий у амплітудних значеннях. Тому потрібно перевести показання мультиметра в амплітудне значення $U_{zLампл} = U_{zLeф} \cdot \sqrt{2} = 46,24 \cdot 1,41 = 65,4$ мВ.**

Знаючи $U_{xLампл}$, струм та його частоту, можемо розрахувати комплексний опір котушки індуктивності

$$z_L = \frac{U_{xLампл}}{i_c} = \frac{46,24 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3}} \cdot 1,41 = 65,38 \text{ Ом.}$$

Тепер можна знайти індуктивний опір

$$\begin{aligned} x_L &= \sqrt{z_L^2 - R_L^2} = \sqrt{z_L^2 - (U_R / i_c)^2} = \sqrt{(65,38)^2 - (15 \cdot 10^{-3} / 1 \cdot 10^{-3})^2} = \\ &= \sqrt{4274,5444 - 225} = 63,63 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Залишилось розрахувати $L = x_L / (2\pi f_c) = 63,63 / (6,28 \cdot 10^4) = 1,013$ мГн.

Враховуючи, що у моделі задана індуктивність 1 мГн, то похибка вимірювання складає 1,3%, що є досить непоганим результатом.

Спробуємо виміряти індуктивність на більш високій частоті. Наприклад, на частоті генератора змінного струму 100 кГц (рис. 8.4).

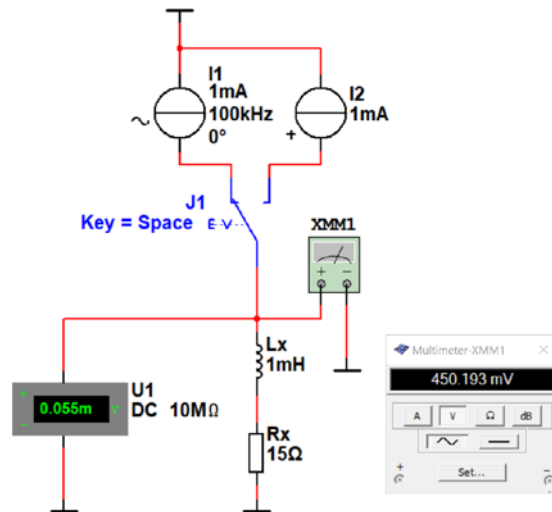


Рис. 8.4. Результат вимірювання падіння змінної напруги на котушці при частоті струму 100 кГц

Переводимо показання мультиметра в амплітудне значення

$$U_{zL_{ампл}} = U_{zL_{ef}} \cdot \sqrt{2} = 450,19 \cdot 1,41 = 636,7 \text{ мВ.}$$

Знаючи $U_{xL_{ампл}}$ розрахуємо комплексний опір котушки індуктивності

$$z_L = \frac{U_{xL_{ампл}}}{i_c} = \frac{636,7 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3}} \cdot 1,41 = 900,2 \text{ Ом.}$$

Тепер можна знайти індуктивний опір

$$\begin{aligned} x_L &= \sqrt{z_L^2 - R_L^2} = \sqrt{z_L^2 - R^2} = \sqrt{(636,7)^2 - 225} = \\ &= \sqrt{405386,89 - 225} = 636,5 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Залишилось розрахувати $L = x_L / (2\pi f_c) = 636,5 / (6,28 \cdot 10^5) = 1,013 \text{ мГн.}$

Тобто, практично, похибка вимірювання не змінилася.

8.2 Завдання для самостійної роботи

Мета роботи: ознайомитись з методом вимірювання індуктивності котушок за допомогою джерел змінного та постійного струму.

1. Ознайомитись з теоретичними відомостями.
2. Зібрати модель наведену на рис. 8.5 і встановити параметри елементів задані для вашого варіанту у табл. 8.1.
3. Виміряти індуктивність методом вимірювання напруги на котушці індуктивності при протіканні через неї постійного та змінного струмів. резонансним методом, використовуючи для цього модель.
4. Відповісти на контрольні питання.

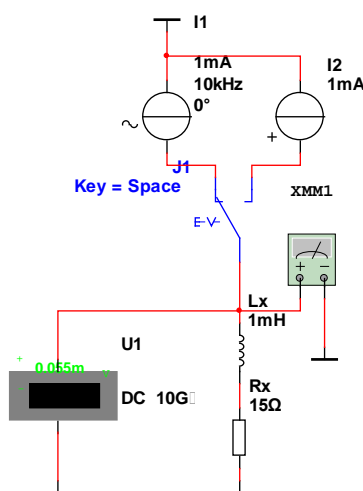


Рис. 8.5. Модель для вимірювання комплексного опору

У звіті навести:

1. Завдання на виконання лабораторної роботи.
2. Схеми моделі з результатами вимірювання напруги на змінному та постійному струмі.
Навести розрахунок індуктивності за наведеним в теоретичній частині прикладом.
3. Зробити висновки з результатів вимірювання.

Зберегти файл звіту і моделі з ім'ям Пр5_Прізвище_гр.ms10 та Пр5_Прізвище_гр.docx, де гр. – учбова група.

Таблиця 8.1. Завдання на практичне заняття 8

№ варіанту	Індуктивність котушки, мкГн	R_L , Ом	№ варіанту	Індуктивність котушки, мкГн	R_L , Ом
1.	120	10	2.	470	43
3.	130	12	4.	510	47
5.	150	15	6.	560	51
7.	180	18	8.	620	62
9.	200	20	10.	680	68
11.	220	22	12.	750	75
13.	270	24	14.	820	82
15.	300	27	16.	910	91
17.	330	30	18.	1000	100
19.	360	33	20.	1100	110
21.	390	36	22.	1200	120
23.	430	39	24.	470	43

Контрольні питання

1. Чи залежить точність вимірювання від частоти генератора змінного струму?
2. Комплексний опір котушки залежить від активного опору котушки? Якщо залежить, то як?
3. Чи залежить індуктивний опір від частоти? Наведіть цю залежність.
4. Навіщо потрібно перераховувати значення відображені на екрані мультиметра?
5. Як розрахувати комплексний опір котушки індуктивності?

Література

1. Вступ до техніки вимірювань: навчальний посібник [Електронний ресурс]: навч. посіб. / В.В. Макаренко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні (1 файл: 10,02 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 224 с.
2. Данилин А. А., Лавренко Н. С. Измерения в радиоэлектронике: Учебное пособие / Под ред. А. А. Данилина. — СПб.: Издательство «Лань», 2017. — 408 с.
3. Метрология и электрические измерения: Учеб. пособие / Е.Д. Шабалдин, Г.К. Смолин, В.И. Уткин, А.П. Зарубин; Под ред. Е.Д. Шабалдина. Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.- пед. ун-т», 2006. 282 с.
4. Поздняков, А. Д. Курс лекций по дисциплине «Метрология и радиоизмерения». В 2 ч. Ч. 1 / А. Д. Поздняков ; Владим. гос. ун-т. – Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2008. – 164 с.
5. Поджаренко В.О., Кулаков П.І., Ігнатенко О.Г., Войтович О.П. Основи метрології та вимірювальної техніки. Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2006. – 151 с.
6. Х. Харт Введение в измерительную технику. – М. Мир, 1998 г. – 388 с.
7. Програмні засоби проектування: Навч. посіб. для студ. спеціальності 171 "Електроніка" спеціалізації "Електронні та інформаційні системи і технології телебачення. кінематографії та звукотехніки" / В.В. Макаренко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні (1 файл: 9.78 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 244 с.

